



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ  
ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΕΣ  
ΛΕΚΑΝΕΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SWMM**

**ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Κ. ΜΠΟΥΚΑΣ**

**Επιβλέπων: Καθηγητής Β. Α.Τσιχριντζής**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2019**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το παρόν τεύχος υπό τον τίτλο «Έλεγχος αποτελεσματικότητας εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης ομβρίων υδάτων σε αστικές λεκάνες με τη χρήση του λογισμικού SWMM», αποτελεί τη μεταπτυχιακή μου εργασία, η οποία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Βασίλη Τσιχριντζή, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο, αλλά και για όλη την βοήθεια, τη στήριξη, τις συμβουλές που μου προσέφερε διαρκώς και την κατανόηση που επεδείκνυε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τον κ. Ιωάννη Κούρτη υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ, ο οποίος ήταν πάντα δίπλα μου να με συμβουλέψει και να με κατευθύνει στη διεκπεραίωση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης από καρδιάς, όλους τους συμφοιτητές μου για όλα αυτά τα χρόνια και τη βοήθεια που παρείχε ο ένας στον άλλο. Μαζί πορευτήκαμε, ζήσαμε όμορφες στιγμές, μεγαλώσαμε, ωριμάσαμε και μυηθήκαμε στο χώρο της Υδρολογίας.

Τέλος, το πιο μεγάλο και ειλικρινές ευχαριστώ πάει στην οικογένεια μου, στους γονείς μου και στην αδερφή μου, που όλα αυτά τα χρόνια στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο, να με γεμίσουν με εφόδια και να γίνω ο άνθρωπος που είμαι. Σας αγαπώ.

Ευάγγελος Κ. Μπούκας

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



Αφιερωμένο στην οικογένεια μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία στόχος είναι η μελέτη, η αναπαράσταση και η προσομοίωση της ΖΖ΄ ζώνης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών με χρήση του μοντέλου SWMM και η διερεύνηση του πλημμυρικού κινδύνου. Επίσης η εργασία στοχεύει στην ανάδειξη της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης της όμβριας απορροής (LID) όσον αφορά τη μείωση του μέγιστου όγκου απορροής και της αιχμής.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους γίνεται η εκτίμηση των ακαθάρτων υδάτων και η κατάρτιση των όμβριων καμπυλών. Παράλληλα γίνεται παρουσίαση της εξέλιξης των μεθόδων διαχείρισης της απορροής και της ορολογίας τους, ενώ αναλύονται οι 3 αειφόρες πρακτικές που εφαρμόζονται στην εργασία, (i) Πράσινες στέγες, και (ii) διαπερατά πεζοδρόμια και (iii) αποσύνδεση οροφής.

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση του λογισμικού SWMM περιγράφοντας τις δυνατότητες του και τις υπολογιστικές διαδικασίες, ενώ ακολουθεί η περιγραφή της περιοχής μελέτης στην Αθήνα και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία, απεικόνιση και μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης. Επίσης περιγράφονται οι διαδικασίες υπολογισμού των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν και ταυτόχρονα κατασκευάζονται τα υετογράμματα σχεδιασμού μέσω της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε για την επίτευξη του καλύτερου αποτελέσματος με σύγκριση με μετρηθέντα υδρογραφήματα, ενώ ο καθορισμός των παραμέτρων των αειφόρων πρακτικών βασίστηκε σε βιβλιογραφία που αφορά και μελέτες για τη συγκεκριμένη περιοχή. Με βάση αυτές τις αειφόρες πρακτικές δημιουργήθηκαν 7 σενάρια.

Ακολούθησε η προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου με βροχοπτώσεις σχεδιασμού διάρκειας 1, 2, 6, και 12h και περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25 και 50 έτη και η παρουσίαση της ικανότητας του δικτύου να ανταποκριθεί. Εφαρμόστηκαν τα 7 σενάρια για περίοδο επαναφοράς 10 ετών και διάρκειες βροχόπτωσης 1 και 12 ωρών, με στόχο την μείωση της απορροής και την αποφυγή πλημμυρισμού των φρεατίων του δικτύου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη του κόστους κατασκευής και του κόστους κύκλου ζωής αυτών των πρακτικών.

Λέξεις κλειδιά: Παντορροϊκό σύστημα, προσομοίωση, SWMM, βιώσιμη διαχείριση των ομβρίων υδάτων, ανάπτυξη χαμηλών επιπτώσεων LIDs, green roof, permeable pavement, rooftop disconnection, life cycle cost.



# EXTENDED ABSTRACT

## **Introduction**

Sewerage systems are necessary in developed urban areas due to the interaction between human activity and the natural circulation of water, which creates two types of water that require drainage. The first type of water that requires drainage is sewage and the second is stormwater. Thus, the general effects of urbanization on drainage or the effects of replacing natural drainage with urban drainage are the production of higher and more coronal peaks in river flow, the introduction of pollutants and the need for manual wastewater treatment.

The purpose of this postgraduate thesis is the study, representation and simulation of the Z2' zone of the Athens sewer combined network using the SWMM model and the investigation of flood risk. The work also aims to demonstrate the effectiveness of alternative rainwater drainage (LID) methods in reducing peak runoff and peak.

## Analysis of water management methods

Given the increasing urbanization worldwide and the impact of urban stormwater on both humans and aquatic ecosystems, managing urban drainage is a critical challenge. So urban drainage management has undergone significant changes in recent decades, shifting approaches that were largely limited (usually with the sole purpose flood mitigation) to a more holistic approach.

The various terms that have been used to describe stormwater management are: Low impact development (LID) and Low impact urban design and development (LIUDD), Water sensitive urban design (WSUD), Integrated urban water management (IUWM), Sustainable urban drainage systems (SUDS) or Sustainable drainage systems (SuDS), Best management practices (BMPs), Stormwater control measure (SCM), Alternative techniques (AT) or Compensatory techniques (CT), Source control and Green Infrastructure.

The term LID, which is used in this work, is commonly used in North America and New Zealand. This approach seeks to minimize the cost of rainwater management by pursuing a "design approach to nature". This name coincides with these pioneering designs of Environmental Sensitive Area (ESA).

In this master thesis three LIDs measures were studied, analyzed, applied and finally evaluated: green Roofs, porous pavement, rooftop disconnection.

### **SWMM Software**

Storm Water Management Model (SWMM) is a dynamic rain-run simulation model. Developed by the US Environmental Protection Agency between 1969 and 1971, it was the first model to analyze urban runoff. Its application is suitable both for individual rainfall events and continuous simulation of the quantity and quality of water runoff mainly in urban and suburban areas. It is used to simulate runoff and various inputs to the sewer networks and effectively enables the sewer networks to be managed irrespective of their size. It is constantly being upgraded, updated and supplemented with new features to make it one of the most complete and user-friendly models in its class today.

SWMM operates by dividing the watershed into a set of hydraulic elements, that is, sub-basins and conduits. Each of these elements is characterized by various hydraulic properties such as size, slope, coefficient of roughness, etc. The SWMM routing section transports the effluent through a system of pipelines, pumps and storage and processing equipment.

Overall this program provides a complete environment of the study area for data entry, simulation of hydrological and hydraulic processes and stream quality and finally presentation of results in different formats (graphs, time series tables, frequency analysis etc).

### Model capabilities

The SWMM simulates various hydrological processes involving surface runoff in urban areas. Such processes are:

- Rainfall
- Water surface evaporation
- Snow accumulation and melting
- Surface storage
- Filtration in unsaturated soil layers
- Infiltration of filtered water into layers of groundwater
- Surface runoff

In all these processes spatial variability can be achieved by dividing the study area into smaller, homogeneous basins, each of which is respectively divided into a permeable and impermeable part. The effluent surface can be channeled between groundwater, basins and inlet points of a drainage system. In addition to hydrological processes, it includes a set of hydraulic forming possibilities.

### Conceptual model

SWMM perceives the drainage system as a series of flows of water and other materials occurring in four main parts of the environment. These sections are (Rossman, 2010):

- Atmosphere compartment
- Land surface compartment
- Groundwater compartment
- Transport compartment

### **Study Area and Methodological Framework**

#### Study area

The oldest part of the sewer network of Athens is the combined section of the network. It is subdivided into sub-basins: B, Γ, Δ, E, ΣΤ, Ζ1, Ζ2, Η1, Η2 and Θ. The stormwater watershed of this area is 1310 he, while the waste water basin is 1250 he. The recipient of this area is KAA., while the recipient of the rain is the stream of P. Daniel and Kifissos river.

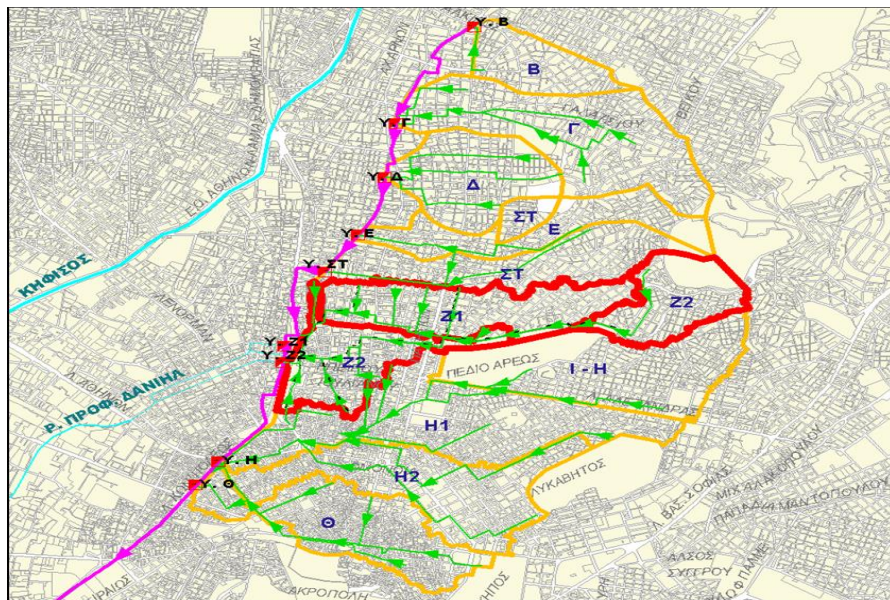


Figure 1: Illustration of the Athens Combined Sewer Network

## Methodological Framework

The work carried out was as follows:

- Inserting the components of combined sewer system into ArcGIS software.
- The digitization of building blocks, junctions and conduits.
- Bisection of the building blocks with the use of AutoCAD software.
- Subsequently, according to the rules of urban hydrology, the urban basins were formed in ArcGIS.
- The digitized drainage network (urban drainage basins, junctions, conduits) was inserted into inp.PINS software, with the help of which it was exported in a format suitable for SWMM software.
- For the return periods  $T = 2, 5, 10, 25, 50$  and for rain's duration  $t = 1, 2, 6, 12$  the hyetographs were made with a time step of 10 minutes. Alternating Block Method was used to create the hyetographs. They were then inserted into the SWMM software.
- Up next was the evaluation of dry weather runoff and they were inserted into SWMM software.
- The model parameters were then calibrated based on recorded rainfall in two conduits.
- The system was simulated, for all return periods and for all rain durations, to see how the system responded, and if and where it flooded.
- The parameters of the three LIDs were then specified.
- Finally, 7 LIDs scenarios were generated for events with a return period  $T=10$  and duration  $t=1$  and 12 hours, which were simulated to see how the model responds and if it continues to flood.

## **Results**

### Calibration

Starting with analyzing the importance and operation of the Nash-Sutcliffe performance factor, we proceeded to calibrate the model using the NSE coefficient on the 1313 and 1640 lines. The efficiency coefficient values were 0.945939 for 1313 and 0.724465 for 1640. The values for both conduits were judged to be satisfactory, based on previous calibrations in these conduits (Kourtis et al. 2017) and despite further trials no better results were obtained.

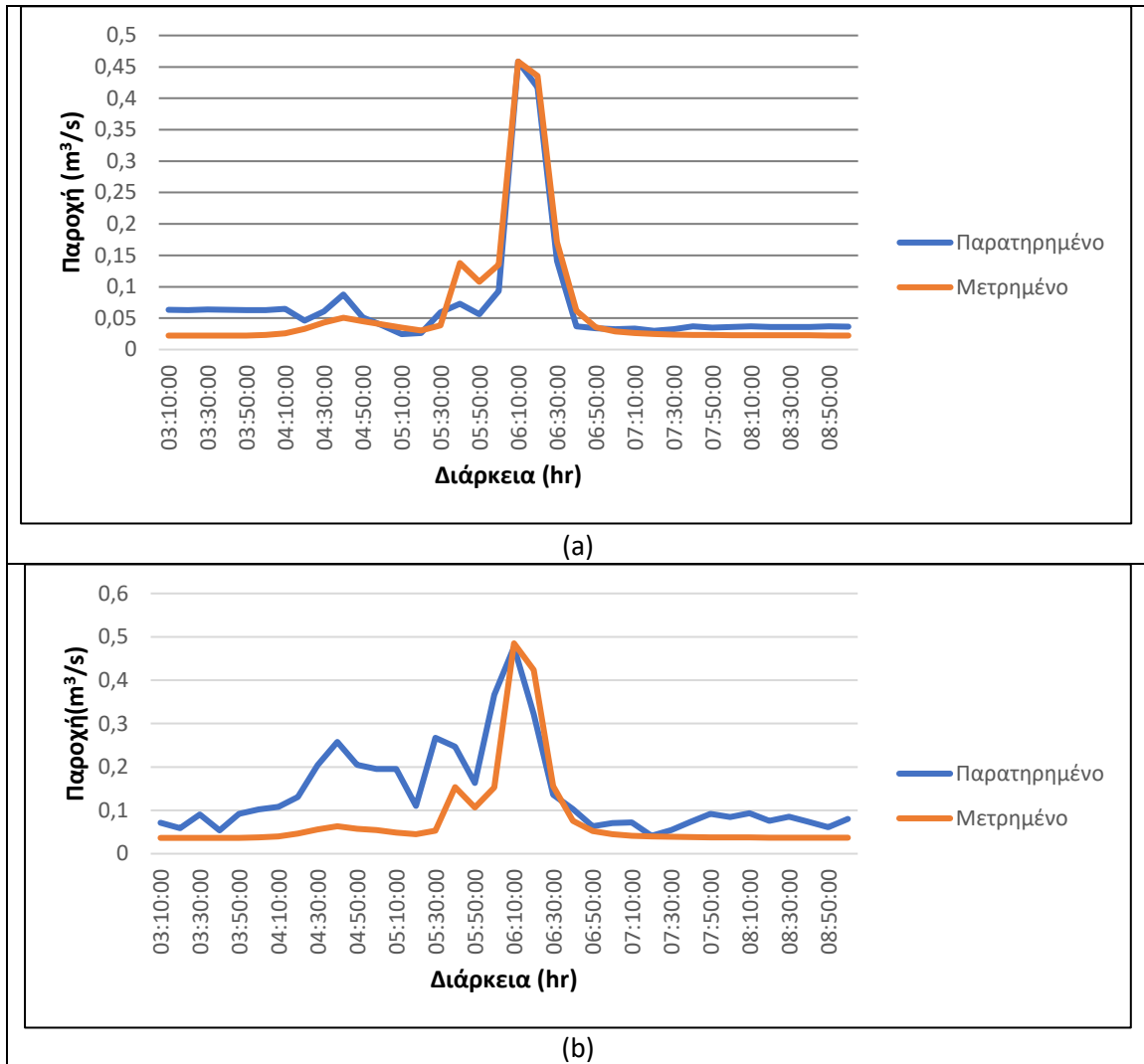


Figure 2: Model calibration on conduits 1313 (a) and 1640 (b)

### System simulation

Then, using the alternating blocks, 20 synthetic rainfalls were created for which the system under study was simulated. The results showed that the system for each simulation failed, that is, there were flooded junctions and conduits that did not meet the limits set by PD (presidential decree)-696/74 (speed  $< 6$  m/s and fill ratio  $\gamma/D > 0.8$ ).

### LID application

When the model was found to be failing, the LIDs for rainwater runoff with a return period of up to 10 years were dimensioned. The aim was to reduce runoff. Peak reduction was achieved in each scenario, and scenario 7 of the combined use of the 3 LID practices achieved the largest reduction, reaching 77% for one-hour duration and 70% for 12 hours duration. Correspondingly,

the smallest reduction was for use of Green Roofs and Rooftop Disconnection with 30% and 18.7% for both durations.

Table 1: Percentage reduction in runoff

<b>LIDs</b>	<b>% Peak Runoff Reduction T10d1</b>	<b>% Peak Runoff Reduction T10d12</b>
<b>Green Roofs</b>	30.0	18.7
<b>GR-PP</b>	60.6	52.8
<b>GR-PP-RD</b>	77.4	70.1
<b>GR-RD</b>	57.7	50.1
<b>Permeable Pavements</b>	30.2	24.8
<b>PP-RD</b>	60.6	52.8
<b>RD</b>	30.0	18.7

#### Cost estimation

Finally, the capital cost, life cycle cost and co-benefit of each scenario were calculated.

The highest capital cost is in scenario 4 with € 20 million (GR-PP) followed by scenario 7 (GR-PP-RD) with € 17 million. The paradox here is that scenario 4 consisting of only 2 meters of LID is more costly than scenario 7 consisting of 3 is explained, because the number of green roofs which is the most expensive measure is reduced. Then the life cycle cost of each scenario was calculated. This considers the initial investment cost (capital cost) and the so-called Operation & Maintenance Costs (O&M). The largest LCC presents scenario 4 at around € 28 million, followed by scenario 7 at around € 25 million. On the other hand, the smallest LCC shows scenario 3. Finally, there is the co-benefit of the money saving, which is based on benefits such as water saving, energy saving due to less use of cooling, improved air quality and carbon capture and other benefits (Alves et al. 2019). For this reason, this particular benefit can also be referred to as an environmental benefit. Values were cited (Alves et al. 2019) and for green roofs 2.91 €/m<sup>2</sup>/y and for permeable pavements 2.87 €/m<sup>2</sup>/y.

#### **Summary and Conclusions**

To summarize, in this master thesis part of the Z2' zone of the Athens combined sewer network was modelled. Then using the SWMM software simulations of the operation of the sewer system

were performed, and sustainable methods of runoff reduction (LIDs) and their economic analysis were applied.

The main conclusions from this work are:

- All the scenarios were able to reduce the peak runoff and the volume of runoff. They are therefore considered satisfactory and certainly preferable to the choice of a zero-sum scenario in which no action is taken.
- All combinatorial scenarios, that is, those that used 2 or 3 LIDs achieved a higher rate of runoff reduction than those applied individually, with scenario 7 leading.
- Implementation of LIDs does not always lead to such desirable results, as based on the literature (Tao et al. 2017, Kourtis et al. 2018), studies have shown to perform better for low intensity and short duration events in reducing both runoff volume as well as peak reduction, while performing worse for high intensity and long duration events.
- Combined scenarios have the highest construction costs, and scenario 4, which consists of only two meters, was higher than the next scenario 7 due to the high presence of green roofs.
- For the same reason that the higher life cycle costs, including operating and maintenance costs, were again the same scenario.
- Still, despite the high cost of this scenario, it does not achieve the highest reduction rate.
- These alternative rainwater management methods incur high construction, maintenance and operating costs. As a result, they appear prohibitive, if cut out, from all the additional benefits they offer (financial, quality, etc.). The economic aspect of these in the present work has been computed bibliographically (Alves et al. 2019) as an environmental benefit, constituting a particularly high amount. The highest environmental benefit comes from scenario 4 and then scenario 7.
- Finally, scenario 7 is preferred as a worthwhile practice, as it achieves the highest peak reduction rate, without having the highest capital cost or life cycle cost, and with the second highest environmental benefit in monetary terms.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	vii
EXTENDED ABSTRACT .....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xx
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xxi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....	23
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
1.1 Αποχέτευση πόλεων και η σημασία της .....	25
1.2 Επιπτώσεις της αστικοποίησης στην αποστράγγιση .....	25
1.3 Ιστορία της αστικής αποστράγγισης.....	26
1.4 Ιστορική αναδρομή αποχετεύσεων Αθηνών .....	26
1.5 Παντοροϊκά και χωριστικά συστήματα .....	27
1.6 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας .....	28
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	29
2.1 Εκτίμηση παροχής απορροών ξηρού καιρού .....	29
2.1.1 Γενικά.....	29
2.1.2 Εκτίμηση παροχής αποχέτευσης ακαθάρτων .....	29
2.2 Κατάρτιση όμβριων καμπυλών.....	30
2.2.1 Εισαγωγή .....	30
2.2.2 Γενική μεθοδολογία .....	30
2.2.3 Δημιουργία υετογραφημάτων σχεδιασμού .....	31
2.3 Προσομοίωση βροχής απορροής .....	33
2.4 Ελληνικές Προδιαγραφές Σχεδιασμού Δικτύων Αποχέτευσης .....	33
2.4.1 Γενικά.....	34
2.4.2 Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων υδάτων .....	34
2.4.3 Δίκτυο Αποχέτευσης Ακαθάρτων .....	34
2.5 Ο δείκτης Nash-Sutcliffe ως εργαλείο βαθμονόμησης.....	35
2.6 Ανάλυση μεθόδων διαχείρισης απορροής .....	36

2.6.1 Εισαγωγή .....	36
2.6.2. Έργα χαμηλού αντίκτυπου (LID).....	37
2.6.3. Αστικός σχεδιασμός ευαίσθητος στο νερό (WSUD) .....	38
2.6.4 Ολοκληρωμένη διαχείριση αστικών υδάτων (IUWM) .....	39
2.6.5 Βιώσιμα αστικά αποστραγγιστικά συστήματα (SUDS) ή βιώσιμα συστήματα αποστράγγισης (SuDS) .....	40
2.6.6 Καλύτερες πρακτικές διαχείρισης (BMPs) .....	40
2.6.7 Μέτρα ελέγχου των ομβρίων υδάτων - Stormwater control measure (SCM).....	41
2.6.8 Εναλλακτικές τεχνικές - Alternative techniques (AT) ή αντισταθμιστικές τεχνικές – Compensatory techniques (CT) .....	42
2.6.9 Έλεγχος πηγής - Source control.....	42
2.6.10 Πράσινη υποδομή – Green Infrastructure .....	43
2.6.11 Παραδείγματα όρων σε άλλες γλώσσες .....	44
2.7 Παρουσίαση των χρησιμοποιηθέντων LIDS .....	45
2.7.1 Πράσινες Στέγες - Green Roofs .....	45
2.7.2 Περπατά οδοστρώματα – Porous pavement .....	52
2.7.3 Αποσύνδεση της οροφής - Rooftop Disconnection .....	57
2.7.4 Μελέτες και παραδείγματα χρήσης LIDs .....	61
2.8 Οικονομική ανάλυση των LIDs.....	66
2.8.1 Εισαγωγή .....	66
2.8.2 Μελέτες Κόστους Απόδοσης Εφαρμογής LID .....	67
<b>3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWMM.....</b>	<b>91</b>
3.1 Γενικά.....	91
3.2 Ιστορική Εξέλιξη του SWMM .....	91
3.3 Δυνατότητες του μοντέλου .....	92
3.4 Τυπικές εφαρμογές του SWMM .....	93
3.5 Εννοιολογική αντίληψη μοντέλου .....	94
3.6 Περιγραφή του SWMM.....	94
3.7 Υπολογιστικές μέθοδοι .....	96
3.7.1 Εισαγωγή .....	96
3.7.2 Επιφανειακή απορροή στο SWMM .....	97
<b>4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....</b>	<b>101</b>

4.1 Γενική περιγραφή.....	101
4.2 Περιγραφή της πορείας των εργασιών για την περιοχή μελέτης και το αποχετευτικό δίκτυο .....	105
4.3 Ψηφιοποίηση και αναπαράσταση του αποχετευτικού δικτύου .....	106
4.4 Χάραξη αστικών λεκανών απορροής.....	106
4.5 Χρήσεις γης .....	109
4.6 Μοντελοποίηση αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό inr.PINS.....	110
4.7 Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο στο SWMM .....	111
4.8 Εισαγωγή δεδομένων αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό SWMM .....	112
4.9 Εκτίμηση παροχών ξηρού καιρού .....	114
4.10 Δημιουργία Υετογραφημάτων .....	116
4.11 Βαθμονόμηση .....	122
4.12 Καθορισμός των παραμέτρων LIDs και των σεναρίων .....	125
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	133
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	143
6.1 Συμπεράσματα .....	143
6.2 Προτάσεις.....	145
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	147
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	153

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Table 1: Percentage reduction in runoff .....	xiv
Πίνακας 2.1: Συγκριτικές μειώσεις φορτίου ρύπων για πράσινη οροφή.....	49
Πίνακας 2.2: Δυνατότητα του περατού οδοστρώματος να πετυχαίνει τους στόχους της διαχείρισης των όμβριων υδάτων .....	55
Πίνακας 2.3: Ικανότητα της αποσύνδεσης οροφής να πετύχει τους στόχους της διαχείρισης της όμβριας απορροής .....	59
Πίνακας 2.4: Κόστος κεφαλαίου για την εφαρμογή ατομικών LID.....	69
Πίνακας 2.5: Στοιχεία κόστους για διαφορετικές πρακτικές LID στο Χονγκ Κονγκ και το Σιάτλ ..	74
Πίνακας 2.6: Διαστάσεις και κόστος μονάδας για βέλτιστα σχέδια των LID. Τα έξοδα O&M εκτιμώνται ως παρούσα αξία (2015 δολάρια), υποθέτοντας έναν κύκλο ζωής εγκατάστασης 30 ετών και ο πληθωρισμός αντισταθμίζεται από το επιτόκιο .....	75
Πίνακας 2.7: Μείωση της μέγιστης απορροής και οικονομική αποδοτικότητα των βέλτιστων σχεδίων.....	76
Πίνακας 2.8: Εκτιμήσεις κόστους κύκλου ζωής των πρακτικών μεμονωμένων GI .....	84
Πίνακας 2.19: Κόστος για μέτρα LID .....	89
Πίνακας 4.1: Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων κάθε λεκάνης .....	115
Πίνακας 4.2: Βαθμονομημένες τιμές παραμέτρων SWMM .....	123
Πίνακας 4.3: Τυπικό εύρος τιμών παραμέτρων για Green Roofs.....	127
Πίνακας 4.4: Τυπικό εύρος τιμών παραμέτρων για Permeable Pavements .....	127
Πίνακας 4.5: Τυπικό εύρος τιμών παραμέτρων για Rooftop Disconnection.....	128
Πίνακας 4.6: Παράμετροι πρακτικών LID.....	130
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα κριτηρίων απόδοσης.....	133
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα προσομιώσεων υπάρχουσας κατάστασης.....	135
Πίνακας 5.3 : Ποσοστιαία μείωση της απορροής.....	137
Πίνακας 5.4: Κόστος κεφαλαίου σεναρίων.....	137
Πίνακας 5.5: Κόστος κύκλου ζωής σεναρίων ανά έτος.....	138
Πίνακας 5.6: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση των πράσινων οροφών .....	140
Πίνακας 5.7: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση των περατών οδοστρωμάτων ..	140
Πίνακας 5.8: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος όλων των σεναρίων.....	141
Πίνακας A1: Υπολογισμός ακαθάρτων υπολεκανών .....	169
Πίνακας A2: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 4 .....	170
Πίνακας A3: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 5 .....	171
Πίνακας A4: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 6 .....	171
Πίνακας A5: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 7 .....	172

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Figure 1: Illustration of the Athens Combined Sewer Network .....	xi
Figure 2: Model calibration on conduits 1313 (a) and 1640 (b).....	xiii
Σχήμα 1.1: Αλληλεπίδραση με το κοινό και το περιβάλλον .....	25
Σχήμα 2.1: Αύξηση της ενσωμάτωσης και της πολυπλοκότητας της διαχείρισης της αστικής αποστράγγισης στην πάροδο του χρόνου .....	37
Σχήμα 2.2: Μια πιθανή ταξινόμηση της ορολογίας της αστικής αποστράγγισης ανάλογα τον προσανατολισμό της.....	45
Σχήμα 2.3: Παραδείγματα πράσινων οροφών .....	46
Σχήμα 2.4: Επίπεδα πράσινης οροφής.....	51
Σχήμα 2.5: Τύπος περατού πεζοδρομίου.....	52
Σχήμα 2.6: Εκχιονισμός περατού οδοστρώματος.....	56
Σχήμα 2.7: Παραδείγματα αποσυνδεδεμένων οροφών.....	57
Σχήμα 2.8: Ισορροπία νερού για διαφορετικούς συνδυασμούς LID .....	69
Σχήμα 2.9: Σύγκριση του κόστους ανά μονάδα όγκου μείωσης της απορροής με χρήση διαφορετικών LID.....	70
Σχήμα 2.10: Κόστος κεφαλαίου έναντι ποσοστού μείωσης της απορροής από συνδυασμούς LID .....	72
Σχήμα 2.11: Μεθοδολογία για τη σύγκριση συνολικών οφελών και κόστους.....	80
Σχήμα 2.12: Συνολικό κόστος, συνολικά οφέλη (μείωση ζημιών + παράγωγα οφέλη) και υπολειμματικές ζημιές για κάθε στρατηγική.....	82
Σχήμα 2.13: Συγκρίσεις των τιμών B/C των διαφορετικών σεναρίων GI στα έξι γεγονότα βροχόπτωσης .....	86
Σχήμα 2.14: Κατασκευαστικό και O&M κόστος για τα 4 LID .....	88
Σχήμα 3.1: Ιδεατή αναπαραγωγή υπολεκάνης στο SWMM .....	97
Σχήμα 3.2: Μη γραμμικό μοντέλο δεξαμενής μιας υπολεκάνης στο SWMM .....	98
Σχήμα 3.3: Είδη υποπεριοχών σε μια υπολεκάνη στο SWMM.....	98
Σχήμα 3.4: Ιδεατός διαχωρισμός υπολεκάνης.....	99
Σχήμα 4.2: Δορυφορική απεικόνιση Ζ2' Ζώνης Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών (Google Earth) .....	104
Σχήμα 4.3: Αποχετευτικό δίκτυο Ζ2' Ζώνης Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	106
Σχήμα 4.4: Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους περιοχής μελέτης .....	107
Σχήμα 4.5: Υδροκριτικές γραμμές οικοδομικών τετραγώνων .....	108
Σχήμα 4.6: Σχηματισμένες αστικές λεκάνες απορροής Ζ2' Ζώνης Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών .....	109
Σχήμα 4.7: Χάρτης χρήσεων γης Ζ2' Ζώνης Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών ( Corine Landcover 2012).....	110
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα λειτουργίας inrPINs .....	111
Σχήμα 4.9: Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο στο λογισμικό SWMM .....	112
Σχήμα 4.10: Αγωγοί βαθμονόμησης 1313 και 1640 .....	114
Σχήμα 4.12: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=1 h.....	117
Σχήμα 4.13: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=1 h.....	118
Σχήμα 4.14: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=1 h.....	119
Σχήμα 4.15: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=1 h.....	120
Σχήμα 4.16: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=1 h.....	121
Σχήμα 4.17: Εισαγωγή παραμέτρων στο SWMM για τις πράσινες οροφές .....	125

Σχήμα 4.18: Εισαγωγή παραμέτρων στο SWMM για περατά πεζοδρόμια .....	126
Σχήμα 4.19: Εισαγωγή παραμέτρων στο SWMM για αποσύνδεση οροφής .....	126
Σχήμα 5.1: Βαθμονόμηση μοντέλου στους αγωγούς 1313(α) και 1640(β) .....	134
Σχήμα 5.2: Υδρογράφημα μιας ώρας (α) και δώδεκα ωρών (β) και περιόδου επαναφοράς 10 χρόνων για τον αγωγό 1621 .....	136
Σχήμα 5.3: Εξέλιξη κόστους κύκλου ζωής του έργου.....	138
Σχήμα 5.4: Κόστος κεφαλαίου έναντι ποσοστού μείωσης της αιχμής απορροής (T10d1) .....	139
Σχήμα A1: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=2 h .....	154
Σχήμα A2: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=6 h .....	155
Σχήμα A3: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=12 h .....	156
Σχήμα A4: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=2h .....	157
Σχήμα A5: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=6h .....	158
Σχήμα A6: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=12h .....	159
Σχήμα A7: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=2h .....	160
Σχήμα A8: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=6h .....	161
Σχήμα A9: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=12h .....	162
Σχήμα A10: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=2h .....	163
Σχήμα A11: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=6h .....	164
Σχήμα A12: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=12h .....	165
Σχήμα A13: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=2h .....	166
Σχήμα A14: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=6h .....	167
Σχήμα A15: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=12h .....	168

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

ACB = Annual Co-benefits  
BC = Bioretention Cell  
B/C = Benefit Cost  
BMPs = Best Management Practices  
BWTPi = Building Works Tender Price Index  
CBA = Cost Benefit Analysis  
CPI = Consumer Price Index  
EAB = Expected Annual Benefits  
EAD = Expected Annual Damage  
GBI = Green Blue Infrastructure  
GI = Green Infrastructure  
GR = Green Roofs  
IT = Infiltration Trench  
LID = Low Impact Development  
LCC = Life Cycle Cost  
NPV = Net Present Value  
NSE = Nash-Sutcliffe  
O&MC = Operation and Maintenance Costs  
PP = Permeable Pavements  
PV = Present Value  
PVB = Present Value of Benefit  
PVC = Present Value of Cost  
RB = Rain Barrel  
RD = Rooftop Disconnection  
RH = Rainwater Harvesting  
SCP = Sponge City Program  
SUDS = Sustainable Urban Drainage Systems  
TSS = Total Suspended Solids  
UAAC = Unit Annual Average Cost  
VS = Vegetated Swale





## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

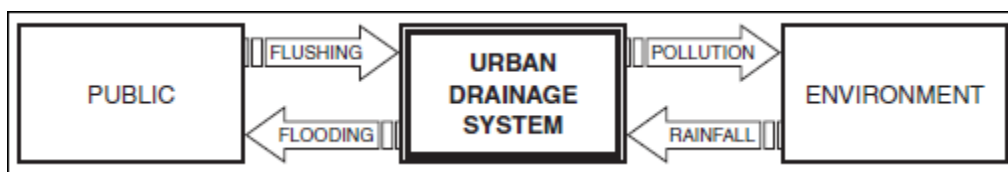
### 1.1 Αποχέτευση πόλεων και η σημασία της

Τα συστήματα αποχέτευσης είναι απαραίτητα σε ανεπτυγμένες αστικές περιοχές λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της ανθρώπινης δραστηριότητας και του φυσικού κύκλου του νερού, η οποία δημιουργεί δύο τύπους νερού που απαιτούν αποστράγγιση.

Ο πρώτος τύπος, είναι τα λύματα, δηλαδή το χρησιμοποιημένο πόσιμο νερό που παρέχεται για τη στήριξη της ζωής, τη διατήρηση ενός βιοτικού επιπέδου και την ικανοποίηση των αναγκών της βιομηχανίας. Μετά τη χρήση, αν δεν αποχετευτούν, μπορεί να προκληθεί ρύπανση και να δημιουργηθούν κίνδυνοι για την υγεία. Τα λύματα περιέχουν διαλυμένο υλικό, στερεά, που προέρχονται από τις τουαλέτες, από πλύσιμο διαφόρων ειδών, από τη βιομηχανία και από άλλες χρήσεις νερού.

Ο δεύτερος τύπος νερού, που απαιτεί αποστράγγιση είναι τα όμβρια, δηλαδή το βρόχινο νερό (ή το νερό που προκύπτει από οποιαδήποτε μορφή κατακρημνισμάτων) που έχει πέσει σε μια κατοικημένη περιοχή και γίνεται απορροή. Εάν τα όμβρια νερά δεν αποστραγγιστούν σωστά, αυτό θα προκαλούσε ζημιές, πλημμύρες και περαιτέρω κινδύνους για την υγεία, καθώς περιέχουν ρύπους, προερχόμενους από τη βροχή, τον αέρα ή την επιφάνεια της λεκάνης απορροής.

Τα αστικά συστήματα αποχέτευσης χειρίζονται αυτούς τους δύο τύπους νερού με στόχο την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων που προκαλούνται στην ανθρώπινη ζωή και το περιβάλλον, δημιουργώντας μια αλληλεπίδραση με το κοινό και με το περιβάλλον (Σχήμα 1.1) (Butler et al. 2018).



Σχήμα 1.1: Αλληλεπίδραση με το κοινό και το περιβάλλον  
Πηγή: Butler et al. (2018)

### 1.2 Επιπτώσεις της αστικοποίησης στην αποστράγγιση

Η αστική αποστράγγιση αντικαθιστά ένα μέρος του φυσικού κύκλου του νερού και, όπως συμβαίνει με κάθε τεχνητό σύστημα που αντικαθιστά φυσικό, αυτό επιφέρει κάποιες συνέπειες. Στη φύση, όταν τα βρόχινα ύδατα πέφτουν σε μια φυσική επιφάνεια, ένα μέρος του νερού

επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω εξάτμισης ή διαπνοής από τα φυτά, ένα άλλο μέρος διεισδύει στα υπόγεια ύδατα και τέλος το υπόλοιπο απορρέει από την επιφάνεια. Η επιφανειακή απορροή τείνει να αυξάνεται καθώς το έδαφος γίνεται κορεσμένο (Τσακίρης 2013).

Η ανάπτυξη μιας αστικής περιοχής, η οποία περιλαμβάνει την κάλυψη του εδάφους με αδιαπέρατες τεχνητές επιφάνειες, έχει σημαντική επίδραση στις διαδικασίες αυτές. Οι τεχνητές επιφάνειες αυξάνουν την ποσότητα της επιφανειακής απορροής σε σχέση με τη διείσδυση και συνεπώς αυξάνουν τη συνολική ποσότητα νερού που φθάνει στον ποταμό κατά τη διάρκεια ή λίγο μετά τη βροχή. Έτσι, οι γενικές επιδράσεις της αστικοποίησης στην αποχέτευση ή οι επιπτώσεις της αντικατάστασης της φυσικής αποστράγγισης με την αποστράγγιση των πόλεων είναι να παράγουν υψηλότερες και πιο αιφνιδιαστικές αιχμές στη ροή των ποταμών, να εισάγουν ρύπους και να δημιουργήσουν την ανάγκη για τεχνητή επεξεργασία λυμάτων (Butler et al. 2018).

### 1.3 Ιστορία της αστικής αποστράγγισης

Τα τεχνητά συστήματα αποστράγγισης αναπτύχθηκαν μόλις οι άνθρωποι επιχείρησαν να ελέγξουν το περιβάλλον τους. Αρχαιολογικά στοιχεία δείχνουν ότι συστήματα αποστράγγισης χρησιμοποιήθηκαν στα κτίρια πολλών αρχαίων πολιτισμών όπως οι Μεσοποτάμιοι και οι Μινωίτες (Κρήτη). Το σύστημα αποχέτευσης στην Κνωσό και άλλες πόλεις δείχνουν ότι οι Αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν ευφυείς τεχνικές. Οι Ρωμαίοι είναι γνωστοί για τα επιτεύγματα τους στον τομέα της δημόσιας υγείας, με δίκτυα αποχέτευσης όπου χρησιμοποιούνταν πήλιντοι σωληνωτοί αγωγοί κάτω από τους δρόμους της πόλης (Τσακίρης 2010).

### 1.4 Ιστορική αναδρομή αποχετεύσεων Αθηνών

Το ιστορικό έργων αποχέτευσης της Αθήνας χωρίζεται σε χρονικές περιόδους με αφετηρία από την αρχαιότητα ως το 1840. Στην αρχαιότητα δεν υπήρχε οργανωμένο δίκτυο αποχέτευσης στην Αθήνα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση θανατηφόρων ασθενειών, όπως η χολέρα και η πανώλη, λόγω των ανοικτών συστημάτων αποχέτευσης, πρακτική που ακολουθήθηκε για 15 αιώνες και αντικαταστάθηκε από το σύστημα διοχέτευσης των λυμάτων σε σηπτικούς βόθρους (<https://www.eydap.gr/>).

Δεύτερη περίοδος από το 1840-1930 με την προσπάθεια υλοποίησης συστήματος συλλογής και μεταφοράς ακαθάρτων και ομβρίων. Η πρώτη γαλλική Αποστολή Δημοσίων Έργων κατασκεύασε το 1860 τον παντοροϊκό αγωγό της Σταδίου, η επέκταση του οποίου υλοποιήθηκε το 1870. Το 1925, ο Δήμος Αθηναίων μελέτησε και κατασκεύασε το “Νέο Μεγάλο Αγωγό”, ενώ την ίδια

περίοδο κατασκευάστηκε ένα μεγάλο τεχνικό έργο, η συμβολή των δύο “Μεγάλων Αγωγών” στις οδούς Μάρνη και Παιωνίου (<https://www.eydap.gr/>).

Ακολούθησε το διάστημα 1930-1950 όπου ολοκληρώθηκε η κατασκευή αγωγού ακαθάρτων του ρέματος Προφήτη Δανιήλ με αποδέκτη το Φαληρικό Δέλτα. Ήταν ένας αγωγός ωσειδής με χερσαίο μήκος περίπου 6,5 χλμ. και υποθαλάσσιο περίπου 700 μ. Ταυτόχρονα με βάση την προμελέτη του καθηγητή Φαντόλι, κατασκευάστηκαν τρία βασικά έργα υποδομής στην Αθήνα, παρά την έναρξη του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, που αφορούσαν:

- Την κατασκευή του Κεντρικού Αποχετευτικού Αγωγού (ΚΑΑ)
- Την κατασκευή του μεγάλου και βασικού συλλεκτήρα, μετά από οριστική μελέτη που συντάχθηκε για τον Ιλισό.
- Τη διευθέτηση τμημάτων του Κηφισού.

Η ραγδαία πολεοδομική ανάπτυξη της πρωτεύουσας από το 1950-1980 και μετά έκανε επιτακτική την ανάγκη για κατασκευή μεγάλων αποχετευτικών έργων. Απόρροια αυτής, ήταν η σύσταση του Οργανισμού Αποχέτευσης Πρωτεύουσας (ΟΑΠ), ο οποίος έθεσε τα θεμέλια για την υποδομή του αποχετευτικού συστήματος της πόλης των Αθηνών (<https://www.eydap.gr/>).

Το 1980 μεταβιβάστηκαν οι αρμοδιότητες του ΟΑΠ (Οργανισμός Αποχέτευσης Πρωτεύουσας) στον ενιαίο φορέα διαχείρισης της ύδρευσης και αποχέτευσης της Αθήνας, την ΕΥΔΑΠ. Ο νέος αυτός φορέας ανέλαβε στον τομέα της αποχέτευσης, την απορροή των λυμάτων και των βιομηχανικών αποβλήτων. Ακόμα ανέλαβε τον έλεγχο της διαδικασίας καθαρισμού των λυμάτων και την τελική διάθεσή τους στη θάλασσα (<https://www.eydap.gr/>).

### 1.5 Παντοροϊκά και χωριστικά συστήματα

Υπάρχουν βασικά δύο τύποι συμβατικού συστήματος αποχέτευσης: το παντοροϊκό σύστημα στο οποίο τα απόβλητα και τα όμβρια ύδατα ρέουν μαζί στον ίδιο αγωγό και το χωριστικό σύστημα στο οποίο τα απόβλητα και τα όμβρια μεταφέρονται σε ξεχωριστούς αγωγούς .

Τα πιο παλιά δίκτυα αποχέτευσης που κατασκευάστηκαν τόσο σε Ευρώπη όσο και σε Αμερική είναι παντοροϊκά (Κουτσογιάννης 2011). Στο Ηνωμένο Βασίλειο, τα περισσότερα από τα παλαιότερα συστήματα αποχέτευσης συνδυάζονται και αυτό αντιπροσωπεύει περίπου το 70% του συνολικού μήκους. Πολλές άλλες χώρες έχουν σημαντικό ποσοστό παντοροϊκών

αποχετεύσεων: στη Γαλλία και τη Γερμανία, για παράδειγμα, το ποσοστό είναι επίσης περίπου 70%, και στη Δανία 45% (Butler et al. 2018).

Στα χωριστικά συστήματα, οι ροές των λυμάτων ποικίλλουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά οι αγωγοί έχουν σχεδιαστεί για να φέρουν τη μέγιστη ροή μέχρι τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων (Butler et al. 2018). Στην Ελλάδα εφαρμόζονται σχεδόν αποκλειστικά χωριστικά συστήματα. Το χωριστικό σύστημα επιτρέπει την πλήρη ανεξαρτησία στο σχεδιασμό των δύο δικτύων (Κουτσογιάννης 2011).

Όλα τα σύγχρονα δίκτυα είναι σχεδόν χωριστικά, διότι τα παντορροϊκά έχουν μειονεκτήματα όπως την υπερχειλίση λυμάτων προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα, κίνδυνο πλημμυρίσματος υπογείων, αναδύσεις οσμών σε ξηρές περιόδους, αυξημένο κόστος αντλήσεων όπου υπάρχουν αντλιοστάσια κτλ. (Κουτσογιάννης 2011, Butler et al. 2018).

## 1.6 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο βρίσκεται η εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας ενώ πέρα από αυτό αναφέρονται και οι βασικές υδρολογικές μέθοδοι ιδιαίτερα κρίσιμες για την κατανόηση των βασικών υδρολογικών-υδραυλικών διεργασιών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά το λογισμικό SWMM ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο εκτελούνται οι κατάλληλες και απαραίτητες διαδικασίες παρουσίασης, επεξεργασίας και μοντελοποίησης της περιοχής μελέτης και του αποχετευτικού δικτύου και παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από όλες τις εργασίες που εκτελέστηκαν, ενώ τέλος στο 6 γίνεται ανάλυση των συμπερασμάτων και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 Εκτίμηση παροχής απορροών ξηρού καιρού

#### 2.1.1 Γενικά

Το δίκτυο αποχέτευσης αστικών λυμάτων ή ακαθάρτων ενός οικισμού ορίζεται ουσιαστικά ως το δίκτυο συλλογής, μεταφοράς, επεξεργασίας και διάθεσης στον τελικό αποδέκτη των υγρών αποβλήτων από οικίες, εμπορικές και βιοτεχνικές μονάδες μιας αστικής περιοχής (Τσακίρης 2010). Το δίκτυο αποχέτευσης ενός οικισμού (Τσακίρης 2010) πρέπει να είναι ικανό να απομακρύνει τη μέγιστη παροχή ακαθάρτων κάθε στιγμή κατά την διάρκεια της ημέρας με τη μέγιστη κατανάλωση νερού.

#### 2.1.2 Εκτίμηση παροχής αποχέτευσης ακαθάρτων

Η διαδικασία που ακολουθείται στην εκτίμηση της παροχής των ακαθάρτων είναι η ακόλουθη (Τσακίρης 2010):

- i. Προσδιορίζεται η μέση ανηγμένη ημερήσια κατανάλωση ανά κάτοικο ( $q$ ) με τις τιμές αυτές να κυμαίνονται για τις μεσογειακές χώρες ανάμεσα σε 200-300 L/ημέρα/κάτοικο.
- ii. Υπολογίζεται η συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση ( $Q_d$ ) για τον πληθυσμό της περιοχής μελέτης ( $P_v$ ).

$$Q_d = P_v q$$

- iii. Υπολογίζεται η συνολική μέγιστη ωριαία κατανάλωση ( $Q_h^{max}$ ).

$$Q_h^{max} = F_1 F_2 Q_d$$

όπου ο πολλαπλασιαστής  $F_{ολ}=F_1F_2$  από 3 μέχρι 9, ενώ η συνήθης τιμή για τις Ελληνικές πρακτικές επιλέγεται να είναι  $F_1F_2=4-6$ . Οι πολλαπλασιαστές ζήτησης εξαρτώνται από το μέγεθος του πληθυσμού, τιμές του δίνονται από τον Τσακίρη (2010).

- iv. Υπολογίζεται η συνολική μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων ( $QA_h^{max}$ ) ως ποσοστό της μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης ( $Q_h^{max}$ ) με συντελεστή  $\mu$  από 60 έως 80%.

$$QA_h^{max} = \mu Q_h^{max}$$

Σύμφωνα με τους Κουτσογιάννη (1993) και Τσακίρη (2010) για τις Ελληνικές προδιαγραφές η μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων ( $QA_h^{max}$ ) υπολογίζεται από τη μέγιστη ημερήσια παροχή ακαθάρτων ( $QA_d^{max}$ ) πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή  $P$  ο οποίος είναι συνάρτηση της μέγιστης ημερήσιας παροχής ακαθάρτων. Δηλαδή ισχύει:

$$\begin{aligned} \text{i.} \quad & QA_h^{max} = PQA_d^{max} \\ \text{ii.} \quad & P = 1.5 + \frac{2.5}{\sqrt{QA_d^{max}}} \leq 3 \end{aligned}$$

Εδώ να τονίσουμε ότι όλα τα μεγέθη παροχών που παρουσιάστηκαν παραπάνω εκφράζονται σε L/s.

## 2.2 Κατάρτιση όμβριων καμπυλών

### 2.2.1 Εισαγωγή

Η κατάρτιση των όμβριων καμπυλών ή καμπύλες ( $i$ ,  $d$ ,  $f$ ) προκύπτουν από τη στατιστική ανάλυση των ισχυρών βροχοπτώσεων μιας συγκεκριμένης περιοχής. Οι καμπύλες ( $i$ ,  $d$ ,  $f$ ) αλληλοσυνδέουν την ένταση ( $i$ , mm/h), τη διάρκεια ( $d$ , h) και τη συχνότητα (συνήθως σε όρους περιόδου επαναφοράς, εκφρασμένη σε χρόνια) των βροχοπτώσεων (Mimikou 2000). Οι καμπύλες αυτές ουσιαστικά αποτελούν αναλυτικές εκφράσεις της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης  $i$  συναρτήσει της διάρκειας καταιγίδας  $d$  και τη περιόδου επαναφοράς  $T$  (McCuen 1998). Οι μετρήσεις (καταγραφές) προέρχονται από καταγεγραμμένα επεισόδια βροχόπτωσης μέσω βροχομέτρων και βροχογράφων. Για κάθε τέτοια αναλυτική έκφραση απαιτούνται ιστορικές χρονοσειρές μέγιστων εντάσεων βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες που (επιθυμητά) ξεκινούν από τα 5 min και καταλήγουν στη μέγιστη διάρκεια βροχής που αφορά στη διαστασιολόγηση και τον υδραυλικό έλεγχο τεχνικών έργων (2 έως 4 ημέρες) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999).

### 2.2.2 Γενική μεθοδολογία

Οι όμβριες καμπύλες περιγράφονται αναλυτικά από τη γενική σχέση (Κουτσογιάννης 1999):

$$i = \frac{a(T)}{b(d)}$$

όπου:

$i$  η μέγιστη ένταση βροχόπτωσης διάρκειας  $d$  για περίοδο επαναφοράς  $T$   
 $a(T)$  κατάλληλη συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς

b(d) κατάλληλη συνάρτηση της διάρκειας βροχόπτωσης

Επίσης η σχέση εκφράζεται αναλυτικά και με άλλες μορφές, καθώς όπως αναφέρει ο Τσακίρης (2010) η σταθερή ένταση της βροχόπτωσης σχεδιασμού, λαμβάνεται από την όμβρια καμπύλη της θεωρούμενης λεκάνης, η οποία εκφράζει τη σχέση της ετήσιας μέγιστης έντασης βροχόπτωσης  $i$ , της διάρκειας  $t$  της ραγδαίας βροχόπτωσης και της περιόδου επαναφοράς  $T$ , μέσω μιας αναλυτικής σχέσης της μορφής :

$$i = i(t, T)$$

Ακόμα αναφέρει ότι στο παρελθόν και για συγκεκριμένη τιμή της περιόδου επαναφοράς χρησιμοποιήθηκαν διάφορε σχέσεις όπως:

$$i = \frac{a}{t + b}$$

ενώ έχει γίνει χρήση σχέσεων που αναδεικνύουν συγχρόνως την επίδραση της διάρκειας και της περιόδου επαναφοράς όπως:

$$i = \frac{c \times T^m}{t + b}$$

Εν κατακλείδι σύμφωνα με την Μιμίκου (2000) η γενική παραμετρική έκφραση των όμβριων καμπυλών μπορεί να αποτυπωθεί ακολουθώς:

$$i = k \times T^a \times d^{-m}$$

### 2.2.3 Δημιουργία υετογραφημάτων σχεδιασμού

Μέσω αυτών των όμβριων καμπυλών προκύπτει η κρίσιμη ένταση της βροχόπτωσης  $i$  (mm/h), η οποία πολλαπλασιασμένη με την χρονική διάρκεια της βροχόπτωσης, έχει ως αποτέλεσμα το συνολικό ύψος βροχόπτωσης για ένα δεδομένο φαινόμενο βροχόπτωσης. Το υετογράφημα της καταιγίδας σχεδιασμού είναι η χρονική κατανομή του ύψους βροχής που πέφτει σε μια λεκάνη. Στη συνήθη πρακτική, χρησιμοποιείται ένα υετογράφημα για όλες τις υπολεκάνες μιας λεκάνης απορροής το οποίο θεωρείται αντιπροσωπευτικό για όλη την ένταση, πρακτική που ακολουθείται και σε περιπτώσεις λεκανών απορροής πολλών τετραγωνικών χιλιομέτρων, όπου η εκτίμηση αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2018). Για την κατάρτιση και τον σχεδιασμό των υετογραφημάτων σχεδιασμού υπάρχουν διάφοροι

τρόποι οι οποίοι κάνουν κατανομή του συνολικού ύψους βροχόπτωσης στα διάφορα χρονικά βήματα. Μερικές από τις μεθόδους αυτές είναι οι εξής:

- μέθοδος της S.C.S
- Μέθοδος του τριγωνομετρικού βροχογραφήματος
- Μέθοδος των εναλλασσόμενων υψών βροχής
- Μέθοδος του δυσμενέστερου συνδυασμού

(<https://geopapaevan.weebly.com/uploads>)

#### Μέθοδος των εναλλασσόμενων υψών ή μπλοκ βροχής

Σύμφωνα με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternating Block Method), η βροχόπτωση διάρκειας  $t$  και περιόδου επαναφοράς  $T$  κατανέμεται ως εξής μέσα στη διάρκειά της. Από τη σχέση έντασης – διάρκειας – περιόδου επαναφοράς της μορφής της σχέσης και γνωρίζοντας ότι το ύψος βροχής ισούται με το γινόμενο της έντασης επί τη διάρκειά της, για βροχοπτώσεις της ίδιας περιόδου επαναφοράς  $T$ , προκύπτει η σχέση:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-m}$$

όπου:

$h_1$ = ύψος βροχής διάρκειας  $t_1$

$h_2$ = ύψος βροχής διάρκειας  $t_2$

$t_1$ =διάρκεια βροχής ύψους  $h_1$

$t_2$ = διάρκεια βροχής ύψους  $h_2$

$m$  σταθερά που υπολογίζεται από την σχέση έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς

Υπολογίζονται τα ύψη βροχής κάθε επιμέρους διάρκειας, τα οποία είναι αθροιστικά. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διαφορές τους που είναι τα ύψη βροχής κάθε χρονικού διαστήματος και κατόπιν γίνεται η κατανομή τους ως εξής: Το μεγαλύτερο ύψος τοποθετείται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από δεξιά, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από αριστερά και ούτω καθεξής. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι να συμπληρωθούν όλα τα χρονικά διαστήματα με τιμές υψών βροχόπτωσης (Μπαλτάς 2018).



Το ΥΠΕΧΩΔΕ (2002) συνιστά το χρονικό βήμα  $\Delta t$  του υετογραφήματος σχεδιασμού να μην υπερβαίνει το 20% του χρόνου συγκέντρωσης κυρίως στο τμήμα της ισχυρής βροχόπτωσης για το οποίο είναι αναγκαία η λεπτομερής καταγραφή των εντάσεων βροχής (Τζιβάνη 2008).

### 2.3 Προσομοίωση βροχής απορροής

Η πολυπλοκότητα της επίλυσης των εξισώσεων Saint Venant, που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός υδρολογικού ή ενός υδραυλικού συστήματος υπό την επίδραση ενός γεγονότος βροχόπτωσης και ο απαιτούμενος χρόνος, οδήγησαν στην ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων. Τα μοντέλα ανάλογα με τη φιλοσοφία θεώρησης της φύσης των μεταβλητών τους χωρίζονται σε προσδιοριστικά ή παραμετρικά μοντέλα και στοχαστικά μοντέλα (Μιμίκου 2006).

Μια ακόμη διάκριση των μοντέλων βροχής – απορροής είναι με βάση τις διαδικασίες οι οποίες μοντελοποιούνται, δηλαδή, αυτές που αφορούν στη συμπεριφορά των υδρολογικών λεκανών απορροής και εκείνες σχετικά με τη συμπεριφορά των αποχετευτικών δικτύων, τα οποία λειτουργούν είτε με ελεύθερη επιφάνεια είτε υπό πίεση (Κούρτης 2016).

Διάφορα μοντέλα είναι διαθέσιμα για τη διαχείριση της απορροής αστικών λεκανών απορροής, ορισμένα από τα οποία είναι:

- HEC-1
- HEC-2 (HEC-RAS)
- TR-20
- TR-55
- SSARR
- MOUSE
- HydroWorks
- HYDRA
- SWOT
- SWMM

### 2.4 Ελληνικές Προδιαγραφές Σχεδιασμού Δικτύων Αποχέτευσης

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται εν συντομία οι Ελληνικοί κανονισμοί που διέπουν την εκπόνηση μελετών ομβρίων υδάτων καθώς και οι βασικοί κανονισμοί, οι οποίοι είναι απαραίτητο να τηρούνται.

#### 2.4.1 Γενικά

Το Νομικό Πλαίσιο το οποίο καθορίζει την εκπόνηση μελετών των δικτύων αποχέτευσης στην Ελλάδα είναι το Προεδρικό Διάταγμα 696/1974 «Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κ.λ.π. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και Κτιριακών έργων, ως και Τοπογραφικών, Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και των σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών». Και ειδικότερα τα άρθρα 208 έως και 219, στα οποία καθορίζονται:

- I. Οι όροι εκπόνησης των μελετών αποχέτευσης ομβρίων και ακαθάρτων υδάτων.
- II. Τα στάδια και τα παραδοτέα τεύχη της προκαταρκτικής μελέτης, της προμελέτης και της οριστικής μελέτης για τα ακάθαρτα, τα όμβρια, καθώς και τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ακαθάρτων.

#### 2.4.2 Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων υδάτων

Με βάση τους Ελληνικούς Κανονισμούς οι βασικοί περιορισμοί, οι οποίοι είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται, κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου ομβρίων, είναι (Π.Δ. 696/74) :

1. Ελάχιστη διάμετρος αποχετευτικού αγωγού 400 mm για μείωση της πιθανότητας έμφραξης των αγωγών.
2. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος πλήρωσης ορίζεται 0.7 για νέους αγωγούς και 0.8 για τους υφιστάμενους αγωγούς.
3. Η μέγιστη ταχύτητα ροής ορίζεται 6 m/s. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει από την απαίτηση αποφυγής διαβρώσεων στους αγωγούς και μείωσης του κινδύνου εμφάνισης ασταθειών στη ροή (Τσακίρης 2010).
4. Η ελάχιστη επιτρεπόμενη κλίση των αγωγών ομβρίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.10. Ο συγκεκριμένος περιορισμός προέκυψε λόγω της απαίτησης για τήρηση μιας ελάχιστης ταχύτητας ροής ίση με 0.6 m/s για λόγους αυτοκαθαρισμού των αγωγών (Τσακίρης 2010).

#### 2.4.3 Δίκτυο Αποχέτευσης Ακαθάρτων

Για το σχεδιασμό ενός δικτύου αποχέτευσης ακαθάρτων κύρια διαδικασία είναι η χάραξη του δικτύου. Βασικό μέγεθος σχεδιασμού είναι η παροχή σχεδιασμού και σε όλο το δίκτυο πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής αρχές (Τσακίρης 2010):

Αρχή I: Το δίκτυο ξεκινά από υψηλότερα υψόμετρα στους αρχικούς κόμβους και καταλήγει στο χαμηλότερο κόμβο, ο οποίος αποτελεί το σημείο συγκέντρωσης όλων των παροχών ακαθάρτων.

Αρχή II: Οι συνθήκες ροής σε ελεύθερη επιφάνεια επικρατούν σε όλο αποχετευτικό δίκτυο.

Αρχή III: Το δίκτυο είναι συνεχούς λειτουργίας.

Αρχή IV: Η παροχή του δικτύου είναι συνεχώς αυξανόμενη από τους αρχικούς στον κεντρικό κόμβο και κατά συνέπεια και οι διατομές των αγωγών.

Σύμφωνα με τους Ελληνικούς κανονισμούς (Π.Δ. 696/74) οι βασικοί περιορισμοί, οι οποίοι είναι απαραίτητο να ακολουθούνται είναι (Τσακίρης 2013):

- η ελάχιστη διάμετρος αγωγού είναι 20 cm.
- ο μέγιστος λόγος πλήρωσης  $y/D$  είναι 0.70. Για πολύ μικρές διατομές προτείνονται μικρότεροι λόγοι πλήρωσης και συγκεκριμένα 0.60 για διάμετρο 50-60 cm και 0.50 για διάμετρο 20-40 cm. Για ήδη κατασκευασμένα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιούνται λόγοι πλήρωσης μέχρι 0.80.
- η μέγιστη ταχύτητα πρέπει να είναι μέχρι 3 m/s, ενώ η ελάχιστη ταχύτητα να μην είναι μικρότερη από 0.56 m/s. Η μέγιστη ταχύτητα περιορίζεται και από τις συνθήκες κρίσιμης ροής. Επιπλέον επιδιώκεται η να βρίσκεται μεταξύ ελάχιστης ταχύτητας και αυτής που προκύπτει για κρίσιμες συνθήκες για. Η ταχύτητα αυτή είναι μικρότερη της  $V_{max}$ .
- η ελάχιστη κλίση τοποθέτησης αγωγών προσδιορίζεται έτσι ώστε για  $Q/Q_0 = 0.10$  η αναπτυσσόμενη ταχύτητα ροής να μην υπερβαίνει 0.30 m/s. Η ταχύτητα αυτή αντιστοιχεί σε ταχύτητα πλήρους διατομής 0.56 m/s.

## 2.5 Ο δείκτης Nash-Sutcliffe ως εργαλείο βαθμονόμησης

Ο δείκτης αποτελεσματικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο και δυνητικά αξιόπιστο στατιστικό στοιχείο για την αξιολόγηση της καλής προσαρμογής των υδρολογικών μοντέλων. Ωστόσο, δεν έχει τεκμηριωθεί μια μέθοδος για την εκτίμηση της στατιστικής σημασίας των τιμών του δείγματος. Ο τύπος που εκφράζεται ο συντελεστής είναι ο ακόλουθος:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_m - Q_o)^2}{\sum (Q_o - Q_{om})^2}$$

όπου:

$Q_m$ : είναι οι προβλεπόμενες τιμές της μεταβλητής  $Q$  του (εξαρτώμενου) κριτηρίου

$Q_o$ : είναι οι μετρηθείσες τιμές της μεταβλητής  $Q$

$Q_{om}$ : είναι ο μέσος όρος των μετρηθεισών τιμών του  $Q$

Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται από αρνητικές έως το ένα. Όταν ο NSE ισούται με 1 σημαίνει, ότι υπάρχει τέλεια αντιστοίχιση της προσομοίωσης στα παρατηρημένα δεδομένα. Η απόδοση του 0 ( $NSE = 0$ ) υποδεικνύει ότι οι προβλέψεις των μοντελοποιημένων τιμών είναι τόσο ακριβείς όσο ο μέσος όρος των παρατηρημένων δεδομένων, ενώ μια απόδοση μικρότερη από μηδέν ( $NSE < 0$ ) συμβαίνει όταν ο παρατηρούμενος μέσος όρος είναι καλύτερος προγνωστικός παράγοντας από το μοντέλο. Ουσιαστικά, όσο πιο κοντά είναι η απόδοση του μοντέλου σε 1, τόσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο.

Ενώ ο δείκτης Nash-Sutcliffe χρησιμοποιείται ευρέως ως δείκτης καλής προσαρμογής, οι τιμές δεν ερμηνεύονται εύκολα επειδή δεν έχει παρουσιαστεί η κατανομή δειγματοληψίας του NSE. Για το λόγο αυτό, οι χρήστες της Ef είναι σε θέση να παρέχουν μόνο υποκειμενικές ερμηνείες των τιμών των δειγμάτων τους. Επομένως, αν ο δείκτης Nash-Sutcliffe πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με κάποια αίσθηση αξιοπιστίας, χρειάζεται περισσότερη γνώση για τις τιμές δείγματος του NSE (McCuen et al. 2006, Nash and Sutcliffe 1970).

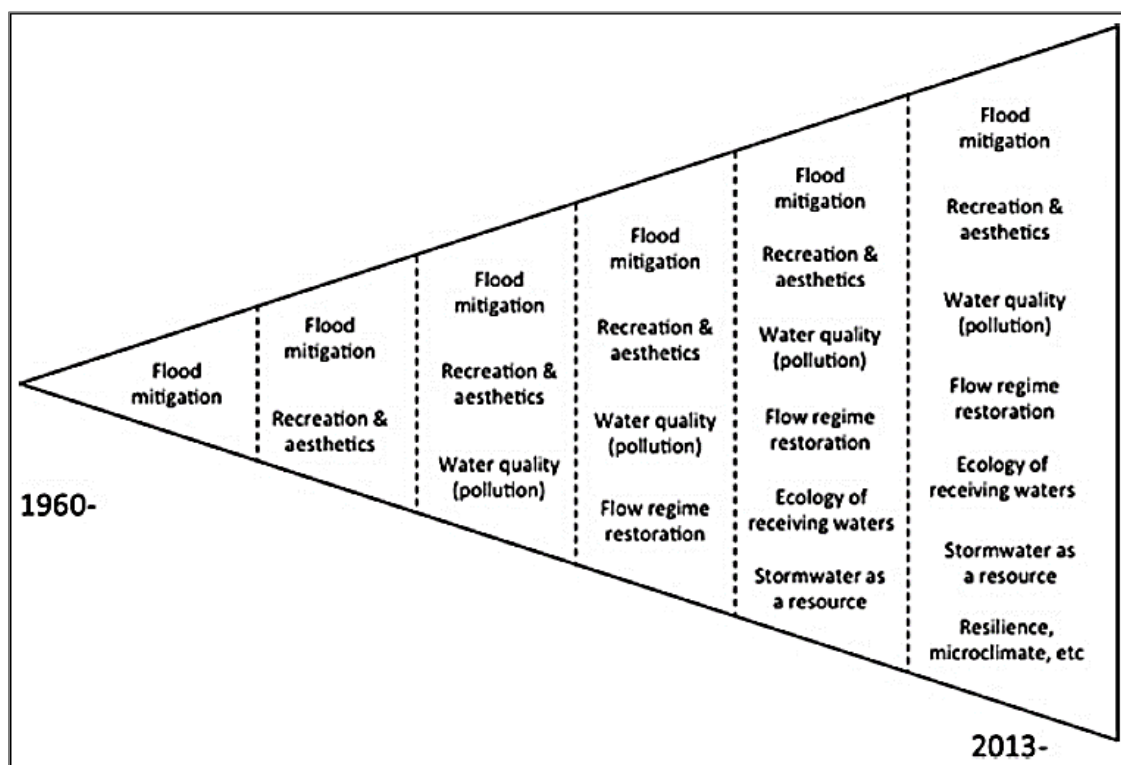
## 2.6 Ανάλυση μεθόδων διαχείρισης απορροής

### 2.6.1 Εισαγωγή

Δεδομένης της αύξησης της αστικοποίησης παγκοσμίως και των επιπτώσεων των αστικών ομβρίων υδάτων τόσο στους ανθρώπους όσο και στα υδάτινα οικοσυστήματα, η διαχείριση της αστικής αποστράγγισης είναι μια κρίσιμη πρόκληση. Η αστικοποίηση έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τους υδάτινους πόρους. Καθώς αναπτύσσεται η γη, αυξάνεται η αδιαπέρατη επιφάνεια και η επιφανειακή απορροή. Λιγότερο νερό διεισδύει στις λεκάνες των υπογείων υδάτων και η απορροή μπορεί να συλλέγει και να μεταφέρει ρύπους στους κατάντη υδατικούς αποδέκτες. Οι πρακτικές ανάπτυξης χαμηλού αντίκτυπου (LID) είναι ένα μέσο για τον μετριασμό των επιπτώσεων της ανάπτυξης και της αστικοποίησης (County of Los Angeles 2009).

Ακόμα εξαιτίας της φύσης της η διαχείριση της απορροής από αστικές περιοχές δεν ακολουθεί κατά κανόνα τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία της σημειακής ρύπανσης. Ειδικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί, από τις οποίες άλλες απαιτούν κατασκευές (κατασκευαστικές μέθοδοι ή structural methods) και άλλες όχι (μη κατασκευαστικές μέθοδοι ή non-structural methods). Οι μέθοδοι αυτές ονομάζονται Μέτρα Βέλτιστης Διαχείρισης (ΜΒΔ ή BMPs) (Τσιχριντζής 1999).

Η διαχείριση λοιπόν της αστικής αποστράγγισης παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές κατά τις τελευταίες δεκαετίες, μετατοπίζοντας τις προσεγγίσεις που ήταν σε μεγάλο βαθμό περιορισμένες (συνήθως με μοναδικό σκοπό τη μείωση των πλημμυρών) σε μια πιο ολιστική προσέγγιση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι όροι που σχετίζονται με την αστική αποστράγγιση, ενώ το Σχήμα 2.1 δείχνει την όλο και πιο ολοκληρωμένη φύση της αποστράγγισης των πόλεων, με όλο και μεγαλύτερη έμφαση στην οικολογία των υδάτων υποδοχής και την παροχή πολλαπλών οφελών.



Σχήμα 2.1: Αύξηση της ενσωμάτωσης και της πολυπλοκότητας της διαχείρισης της αστικής αποστράγγισης στην πάροδο του χρόνου  
Πηγή: Fletcher et al 2015.

#### 2.6.2. Έργα χαμηλού αντίκτυπου (LID)

Ο όρος χαμηλός αντίκτυπος ανάπτυξης (LID) χρησιμοποιείται συνήθως στη Βόρεια Αμερική και τη Νέα Ζηλανδία. Αυτή η προσέγγιση προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος της διαχείρισης των ομβρίων υδάτων, ακολουθώντας ένα «σχεδιασμό προσέγγισης της φύσης». Το όνομα αυτό συνήχησε με αυτούς τους πρωτοπόρους σχεδιασμούς περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών (Environmental Sensitive Area-ESA). Για παράδειγμα, ο Eagles (1981) χρησιμοποίησε τον όρο για να περιγράψει την κεντρική πολιτική στον προγραμματισμό των ESA, ώστε να επιτρέπεται μόνο η ανάπτυξη μικρού αντίκτυπου, προστατεύοντας περιοχές "επαναφόρτισης των υδροφορέων

και πηγών". Αυτό βοήθησε να δοθεί νέα έμφαση στην απορροή των αστικών ομβρίων υδάτων και στην ποιότητα των υδάτων, συμβάλλοντας εν μέρει στην ανάπτυξη του εθνικού προγράμματος Urban Runoff.

Ο αρχικός στόχος των LID ήταν να επιτευχθεί μια «φυσική» υδρολογία με τη χρήση της διάταξης του χώρου και των ολοκληρωμένων μέτρων ελέγχου. Τα LID αποθάρρυναν την τότε συνήθη πρακτική των μεγάλων λύσεων στο τέλος της λεκάνης απορροής λόγω της αδυναμίας τους να καλύψουν αυτή την υδρολογική αποκατάσταση. Η πρακτική των LID χαρακτηρίστηκε από τεχνικές επεξεργασίας ομβρίων υδάτων μικρότερης κλίμακας, όπως συστήματα βιοκαθαρισμού, πράσινες στέγες και τάφροι αποστράγγισης, που βρίσκονται στην πηγή της απορροής ή κοντά σε αυτήν. Παρόμοιες προσεγγίσεις εφαρμόστηκαν αλλού, κυρίως στη Νέα Ζηλανδία, όπου δόθηκε έμφαση στο σχεδιασμό του χώρου για να αποφευχθεί η ρύπανση (και όχι η διαχείριση του συστήματος ροής). Η εθνική «καθαρή-πράσινη εικόνα» στη Νέα Ζηλανδία ήταν μέρος ενός ερευνητικού προγράμματος με το όνομα Low Impact Urban Design and Development ή LIUDD (Zhou 2014). Το LIUDD θεωρήθηκε ότι ταίριαζε άνετα με την γενική ιδέα των Μαορί για το περιβάλλον.

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990, η ερμηνεία των LID είχε απομακρυνθεί από την αρχική της έννοια για να συμπεριλάβει οποιοδήποτε σύνολο πρακτικών που αντιμετωπίζουν όμβρια ύδατα. Η χρήση των LID κωδικοποιήθηκε στη νομοθεσία σε όλη τη Βόρεια Αμερική (Toronto Region Conservation Authority 2010). Ως εκ τούτου, η πρακτική των LID έχει γίνει ένα βασικό, αν και όχι πανταχού παρόν, μέσο διαχείρισης των ομβρίων υδάτων στις ΗΠΑ και στον Καναδά. Ίσως σημαντικό, ο όρος LID δεν περιέχει τη λέξη «νερό» και κατά κάποιο τρόπο, αυτό μπορεί να συνέβαλε στη συμμετοχή άλλων κλάδων, όπως η αρχιτεκτονική, ο σχεδιασμός, η οικονομία, η οικολογία και οι κοινωνικές επιστήμες (Fletcher et al. 2015).

#### 2.6.3. Αστικός σχεδιασμός ευαίσθητος στο νερό (WSUD)

Ο όρος «ευαίσθητος στο νερό αστικός σχεδιασμός» (WSUD) άρχισε να χρησιμοποιείται στη δεκαετία του 1990 στην Αυστραλία και ήταν αρκετά ευρύς. Οι στόχοι του WSUD απαριθμούνται ως εξής:

1. διαχείριση του ισοζυγίου ύδατος (εξέταση υπόγειων υδάτων και ροών, μαζί με ζημιές από πλημμύρες και διάβρωση ποταμών),

2. να διατηρούν και, όπου είναι δυνατόν, να βελτιώνουν την ποιότητα των υδάτων (συμπεριλαμβανομένων των ιζημάτων, την προστασία της παράκτιας βλάστησης και την ελαχιστοποίηση της εξαγωγής ρύπων στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα),
3. να ενθαρρύνουν τη διατήρηση των υδάτων (ελαχιστοποιώντας την εισαγωγή πόσιμου νερού, μέσω της συλλογής των ομβρίων υδάτων και της ανακύκλωσης των λυμάτων και μειώνοντας τις απαιτήσεις άρδευσης), και
4. να διατηρήσουν τις περιβαλλοντικές και ψυχαγωγικές ευκαιρίες που σχετίζονται με το νερό .

Στα αμέσως επόμενα χρόνια, η έννοια του WSUD περιγράφηκε ως μια «φιλοσοφική προσέγγιση του πολεοδομικού σχεδιασμού και του σχεδιασμού που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των υδρολογικών επιπτώσεων της αστικής ανάπτυξης στο περιβάλλον». Η διαχείριση των ομβρίων υδάτων είναι ένα υποσύνολο του WSUD (Fletcher et al. 2015). Αναφέρεται στους στόχους του WSUD ότι περιλαμβάνει:

1. Προστασία και ενίσχυση των φυσικών υδατικών συστημάτων στις αστικές περιοχές.
2. Ενσωμάτωση της επεξεργασίας των ομβρίων υδάτων στο τοπίο με την δημιουργία διαδρόμων πολλαπλών χρήσεων που μεγιστοποιούν την οπτική και ψυχαγωγική άνεση.
3. Προστασία της ποιότητας του νερού που εξέρχεται από τον αστικό ιστό.
4. Μείωση των απορροών και των μέγιστων ροών από τις αστικές περιοχές με τη χρήση τοπικών μέτρων κατακράτησης και την ελαχιστοποίηση των αδιαπέρατων περιοχών, και
5. Την προσθήκη αξίας ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος ανάπτυξης της υποδομής αποστράγγισης (WSUD Guidelines 2013 [https://www.melbournewater.com.au/sites/default/files/South-Eastern -councils-WSUD\\_guidelines.pdf](https://www.melbournewater.com.au/sites/default/files/South-Eastern -councils-WSUD_guidelines.pdf)).

Αν και προερχόμενος από την Αυστραλία, ο όρος WSUD χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο διεθνώς, ιδιαίτερα στο Ηνωμένο Βασίλειο και τη Νέα Ζηλανδία (Ashley et al. 2013).

#### 2.6.4 Ολοκληρωμένη διαχείριση αστικών υδάτων (IUWM)

Η έννοια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των αστικών υδάτων (IUWM) είναι, εξ ορισμού, σαφώς ευρύτερη από εκείνες που αφορούν καθαρά ή πρωτίστως τη διαχείριση αποχέτευσης σε αστικά κέντρα. Η IUWM προέρχεται από τον ακόμη ευρύτερο όρο, ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων, που σχετίζεται με την ολοκληρωμένη διαχείριση όλων των τμημάτων του κύκλου του

νερού μέσα σε μια λεκάνη. Οι αρχές στις οποίες βασίζεται η IUWM ποικίλλουν σε κάποιο βαθμό μεταξύ των συγγραφέων, αλλά γενικά ακολουθούν εκείνες που περιγράφει ο Mitchell (2006):

1. «να λαμβάνουν υπόψη όλα τα μέρη του κύκλου του νερού, φυσικά και κατασκευασμένα, επιφανειακά και υπόγεια, αναγνωρίζοντάς τα ως ολοκληρωμένο σύστημα,
2. να εξετάζουν όλες τις απαιτήσεις για το νερό, τόσο ανθρωπογενές όσο και οικολογικό,
3. να μελετούν το τοπικό πλαίσιο, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές, πολιτιστικές και οικονομικές προοπτικές,
4. να επιδιώκουν τη βιωσιμότητα, με στόχο την εξισορρόπηση των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών αναγκών σε βραχυπρόθεσμο, μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα».

#### 2.6.5 Βιώσιμα αστικά αποστραγγιστικά συστήματα (SUDS) ή βιώσιμα συστήματα αποστράγγισης (SuDS)

Οι εξελίξεις στην αλλαγή της προσέγγισης για τη διαχείριση των ομβρίων υδάτων στο Ηνωμένο Βασίλειο άρχισαν με συντονισμένο τρόπο στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και το 1992 δημοσιεύθηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές μέσα από «το Πεδίο Εφαρμογής για τον έλεγχο της Αστικής Απορροής» (CIRIA 2001), δίνοντας οδηγίες για μια σειρά τεχνικών επιλογών ελέγχου. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, η αποδοχή της διαχείρισης των ομβρίων υδάτων προχώρησε πιο γρήγορα στη Σκωτία από ότι στην Αγγλία και την Ουαλία, συμπεριλαμβανομένης μιας ισχυρής ρυθμιστικής ώθησης από την Σκωτσέζικη Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος - Scottish Environmental Protection Agency για την υλοποίηση των BMPs των ομβρίων υδάτων σε νέες εξελίξεις.

Ένα μεγάλο σύνολο εγγράφων οδηγιών δημοσιεύθηκε το 2000, με παρόμοια αλλά ξεχωριστά εγχειρίδια σχεδίασης για τη Σκωτία και τη Βόρεια Ιρλανδία και την Αγγλία και την Ουαλία (CIRIA 2000) και υπήρξε επίσημα ο όρος "βιώσιμα αστικά αποστραγγιστικά συστήματα" (SUDS). Στην πρακτική του Ηνωμένου Βασιλείου, τα SUDS αποτελούνται από μια σειρά τεχνολογιών και τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την αποστράγγιση των επιφανειακών ομβρίων υδάτων με τρόπο που είναι (αναμφισβήτητα) πιο βιώσιμος από τις συμβατικές λύσεις.

#### 2.6.6 Καλύτερες πρακτικές διαχείρισης (BMPs)

Στο πλαίσιο της Βόρειας Αμερικής (πρωτίστως των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά), η καλύτερη πρακτική διαχείρισης (BMP) χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα είδος πρακτικής ή



μια δομημένη προσέγγιση για την πρόληψη της ρύπανσης. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο όρος BMP δημιουργήθηκε - αλλά δεν καθορίστηκε ρητά - ως μέρος του νόμου Περί Καθαρού Υδατος (CWA) (2011), όταν είχε αρχικά συνταχθεί το 1972. Πιο συγκεκριμένα στην αστική αποστράγγιση, ο όρος έχει μια ιστορική βάση στη διαχείριση των διαδικασιών επεξεργασίας λυμάτων και επικεντρώνεται κυρίως σε μη κατασκευαστικά μέτρα (π.χ. κατάρτιση χειριστών, συντήρηση και τυποποιημένες διαδικασίες λειτουργίας). Οι δραστηριότητες επικεντρώθηκαν στη λειτουργία μονάδων επεξεργασίας λυμάτων κεντρικών συστημάτων.

Ο ορισμός των BMP έχει ωριμάσει σε έναν περισσότερο ή λιγότερο καθολικό όρο που αναφέρεται σε δραστηριότητες πρόληψης της ρύπανσης, σύμφωνα με τον νόμο για την «Πρόληψη της Ρύπανσης» (Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής 1990). Συνεπώς, ο όρος περιλαμβάνει πρακτικές που διαθέτουν τόσο μη δομικές (επιχειρησιακές ή διαδικαστικές πρακτικές π.χ., ελαχιστοποίηση της χρήσης χημικών λιπασμάτων και παρασιτοκτόνων) όσο και διαρθρωτικά χαρακτηριστικά (υποδομές) (Τσιχριντζής 1999).

Η χρήση του όρου «καλύτερο» στην BMP μπορεί να είναι παραπλανητική, καθώς δεν υπάρχει καθορισμένο πρότυπο κατά το οποίο να μετράται η αποτελεσματικότητα ή η απόδοση ενός BMP.

#### 2.6.7 Μέτρα ελέγχου των ομβρίων υδάτων - Stormwater control measure (SCM)

Η ενσωμάτωση του όρου BMP στους αμερικανικούς κανονισμούς σήμαινε ότι σχεδόν κάθε αμερικανική πολιτεία ενέκρινε τον όρο BMP στην στοχοθεσία του για τον έλεγχο των ομβρίων. Ωστόσο, καθώς εγκαθίστανται τα BMPs, αναγνωρίστηκε ότι (i) μεγάλο μέρος όσων κατασκευάζονταν δεν ήταν σαφώς «βέλτιστη πρακτική» και ότι ο όρος BMP ήταν υπερβολικά ασαφής. Εν μέρει ως απάντηση στην έλλειψη αντικειμενικής προσέγγισης στη διαχείριση των ομβρίων υδάτων, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας των Εθνικών Ακαδημιών Μηχανικής και Επιστημών των ΗΠΑ επιφορτίστηκε με μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της πρακτικής διαχείρισης των ομβρίων υδάτων (Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας 2008). Ένα από τα βασικά ευρήματα ήταν η καθολική συμφωνία για την εγκατάλειψη του όρου BMP υπέρ του όρου «Μέτρο Ελέγχου των Ομβρίων Υδάτων» (SCM), ώστε να αναφέρεται τόσο στα δομικά μέτρα (π.χ. συστήματα βιοκατακράτησης) όσο και στα μη διαρθρωτικά μέτρα ελέγχου (π.χ. οικιακά προγράμματα απορροής). Ένα βασικό στοιχείο του όρου είναι ότι δεν μεταφέρει κάποια αξιολόγηση ως προς το γεγονός εάν μια επιλεγθείσα πρακτική λειτουργεί «καλύτερα» (Fletcher et al. 2015).

#### 2.6.8 Εναλλακτικές τεχνικές - Alternative techniques (AT) ή αντισταθμιστικές τεχνικές – Compensatory techniques (CT)

Ο όρος εναλλακτικές τεχνικές (ATs) ή στα γαλλικά (TAs) άρχισε να χρησιμοποιείται στις αρχές της δεκαετίας του 1980 στις γαλλόφωνες χώρες για να περιγράψει ένα νέο μοντέλο αστικής αποστράγγισης απομακρυνόμενο από το παραδοσιακό «ταχεία διάθεση». Η επέκταση των πόλεων και των προαστίων, ιδίως στο Παρίσι, μαζί με το κόστος ενίσχυσης ή κατασκευής παραδοσιακών δικτύων και η ανησυχία για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, δημιούργησαν την ώθηση για πιο φυσικές λύσεις, ονομαζόμενες ATs. Προωθήθηκαν όχι μόνο για να λυθούν τα προβλήματα αποστράγγισης και ρύπανσης, αλλά και για τις δυνατότητές τους να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής. Ο όρος «εναλλακτικός» χρησιμοποιήθηκε με την έννοια του «αντισυμβατικού», και μάλιστα ακόμη και με την έννοια του «ενάντια» στις συντηρητικές λύσεις (Fletcher et al. 2015).

Εναλλακτικές τεχνικές που αποσκοπούν στο να αντιδράσουν στο φαινόμενο της αστικής επέκτασης με (i) τη βελτιστοποίηση της χρήσης της αστικής γης και (ii) τον περιορισμό του επενδυτικού κόστους. Επομένως, ονομάζονταν επίσης αντισταθμιστικές τεχνικές, καθώς θεωρούνταν ότι αντισταθμίζουν τις επιπτώσεις της αστικοποίησης. Ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε ιδιαίτερα στο Μπορντό (Γαλλία) από τη δεκαετία του '80. Η χρήση του όρου «τεχνικές» στις ATs ίσως οδήγησε σε παρεξηγήσεις, με διαφορές στην ερμηνεία μεταξύ εκείνων που έλαβαν μια άποψη, μόνο διαρθρωτικής λύσης, ενώ άλλοι θεωρούσαν μια ευρύτερη φιλοσοφία αστικού σχεδιασμού (Fletcher et al. 2015).

#### 2.6.9 Έλεγχος πηγής - Source control

Ο όρος Πηγή Ελέγχου χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να γίνει διάκριση μεταξύ των επιτόπιων συστημάτων ομβρίων υδάτων και των πρακτικών που θα χρησιμοποιηθούν στην πηγή όπου παράγεται απορροή, σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες λεκάνες κράτησης που κατασκευάζονται στο κατάντη άκρο ενός δικτύου αποστράγγισης. Η αρχική βιβλιογραφία για τον σχεδιασμό διαχείρισης των ομβρίων υδάτων στη Βόρεια Αμερική επικεντρώθηκε στην κατακράτηση για να μετριάσει την αυξημένη απορροή, επεξεργάζοντας τις επιτόπιες πρακτικές (ή τις πηγές ελέγχου) ως ένα υποσύνολο τεχνικών κατακράτησης με ουσιαστικά μόνο τον έλεγχο της ποσότητας ως αντικείμενο.

Με την εμφάνιση των LID στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ο όρος έλεγχος πηγής συσχετίστηκε με τη χρήση πρακτικών μικρής κλίμακας που διαδόθηκαν σε όλη τη λεκάνη απορροής προκειμένου να αναπαράγουν ή να διατηρήσουν τις υδρολογικές συνθήκες πριν από την ανάπτυξη.

Η επιθυμία να ληφθούν υπόψη οι αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης οδήγησε στην εξέταση των επιπτώσεων της απορροής με πιο ολιστικό και ολοκληρωμένο τρόπο. Ο έλεγχος πηγής θεωρείται ότι συμβάλλει στην άμβλυνση των επιπτώσεων των ομβρίων υδάτων στα ύδατα υποδοχής, προωθώντας τον έλεγχο της ροής, την εξατμισοδιαπνοή και τη διείσδυση όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πηγή, ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις τόσο τις υδρολογικές όσο και της ποιότητας του νερού λόγω της ανάπτυξης (Fletcher et al. 2015).

#### 2.6.10 Πράσινη υποδομή – Green Infrastructure

Ο όρος «πράσινη υποδομή» (GI) εμφανίστηκε στις ΗΠΑ στη δεκαετία του 1990 και είναι μια έννοια που ξεπερνά τα όμβρια ύδατα. Το GI φαίνεται ότι έχει προέλευση τόσο από την αρχιτεκτονική του τοπίου, όσο και από την τοπική οικολογία. Οι Benedict και McMahon (2002) υποδηλώνουν ότι η GI είναι τόσο έννοια όσο και διαδικασία. Η ιδέα της GI επηρεάζει τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τις διατάξεις ώστε να μεγιστοποιήσει τη συμμετοχή διαδρόμων χώρου πρασίνου, αλλά η διαδικασία GI προσπαθεί επίσης να μεγιστοποιήσει τα οφέλη από τέτοιους χώρους πρασίνου, προσδιορίζοντας τις δυνητικές υπηρεσίες οικοσυστήματός τους (Center for Neighborhood Technology 2010). Μεταξύ αυτών των υπηρεσιών, η χρήση του GI για την υποβοήθηση της διαχείρισης των ομβρίων υδάτων πραγματοποιήθηκε από την US EPA (2012) και άλλες και τώρα ο όρος χρησιμοποιείται συχνά εναλλακτικά με τα BMPs και LID.

Η GI οριοθετείται ποικιλοτρόπως στη βιβλιογραφία διαχείρισης των ομβρίων υδάτων των ΗΠΑ ως ένα δίκτυο αποκεντρωμένων πρακτικών διαχείρισης των ομβρίων υδάτων, όπως πράσινες στέγες, δέντρα, κήποι βιοκατακράτησης και διαπερατά πεζοδρόμια που μπορούν να αιχμαλωτίσουν και να διηθήσουν τη βροχή όπου πέφτει, μειώνοντας έτσι την απορροή των ομβρίων υδάτων και βελτιώνοντας την υγεία των γύρω υδάτινων οδών.

Πρόσφατα, ο όρος αναγνωρίστηκε από την US EPA (2012): «Οι πράσινες υποδομές είναι μια προσέγγιση που οι κοινότητες μπορούν να επιλέξουν ώστε να διατηρούν υγιή τα ύδατα, να παρέχουν πολλαπλά περιβαλλοντικά οφέλη και να υποστηρίξουν βιώσιμες κοινότητες. Σε αντίθεση με την ενιαία γκρίζα υποδομή ομβρίων υδάτων η πράσινη υποδομή χρησιμοποιεί τη

βλάστηση και το έδαφος για τη διαχείριση των ομβρίων υδάτων και παρέχει όχι μόνο διαχείριση των ομβρίων υδάτων, αλλά και μετριασμό των πλημμυρών, διαχείριση της ποιότητας του αέρα και πολλά άλλα » (Fletcher et al. 2015).

#### 2.6.11 Παραδείγματα όρων σε άλλες γλώσσες

Σε πολλές μη αγγλόφωνες χώρες, έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά διεθνώς αποδεκτοί όροι ή άμεσες μεταφράσεις τους. Ωστόσο, το τοπικό πλαίσιο και η γλώσσα συχνά παρέχουν χρήσιμες γνώσεις σχετικά με τα κίνητρα και τους στόχους των τοπικών πρακτικών.

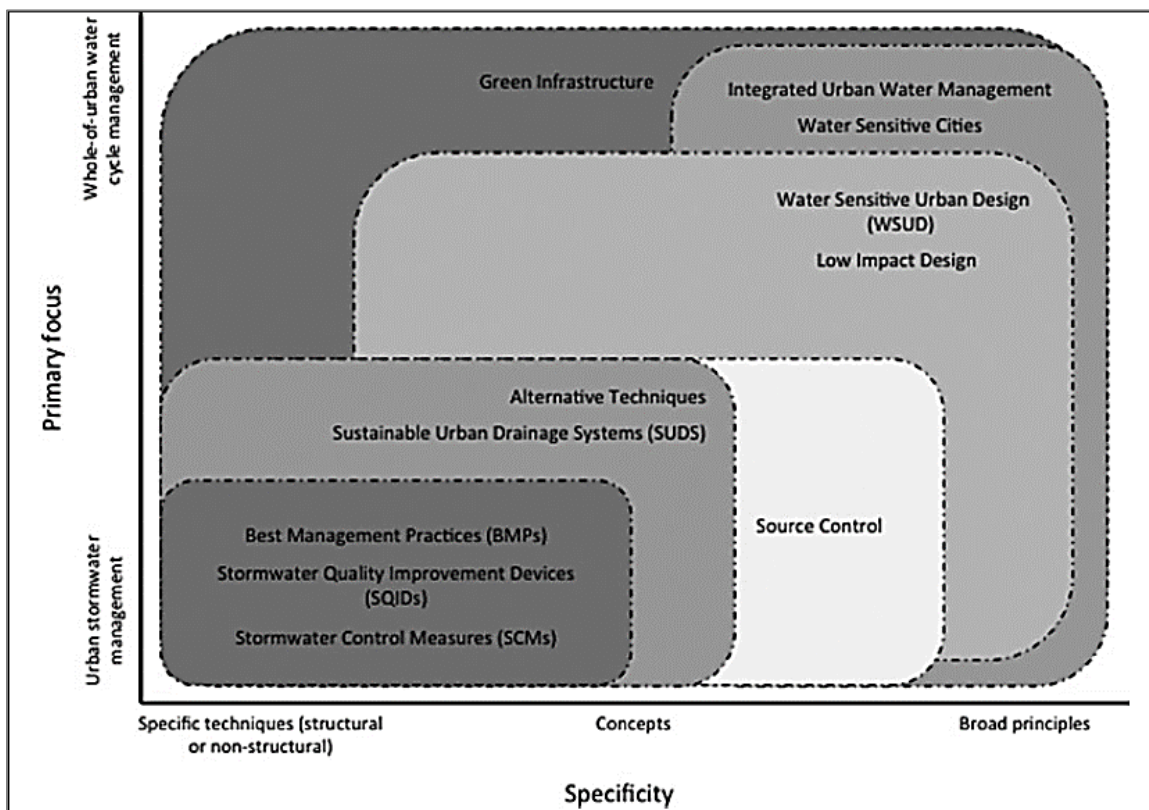
Στη Σουηδία, ο όρος BMP χρησιμοποιείται συνήθως από συγγραφείς στη διεθνή βιβλιογραφία. Εντούτοις, οι επαγγελματίες υιοθέτησαν επίσης τους σουηδικούς όρους τοπικών πολιτικών και εγγράφων σχεδιασμού, όπως ο τοπικός χειρισμός των ομβρίων υδάτων (LOD; local handling of stormwater) και η ανοικτή αποστράγγιση των ομβρίων υδάτων (open stormwater drainage), που αναφέρεται στον έλεγχο της πηγής (Fletcher et al. 2015).

Στη Δανία, ο όρος LAR (τοπική εκτροπή των ομβρίων υδάτων) εισήχθη στη δεκαετία του 1990 και υιοθετήθηκε ευρέως. Είναι παρόμοιο αλλά όχι πανομοιότυπο με τον Σουηδικό όρο LOD, διότι εστιάζει γλωσσολογικά στην εκτροπή και όχι στην αποθήκευση νερού και συνεπώς αντανακλά μόνο ένα περιορισμένο εύρος προοπτικών και τεχνολογιών σε σύγκριση με όρους όπως το SUDS και το WSUD (<http://wsud-denmark.com/>, Zhou 2014).

Στη Γερμανία, η αλλαγή προς στρατηγικές και τεχνικές χαμηλού αντίκτυπου ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αρχικά με επίκεντρο τις μεμονωμένες τεχνολογίες, όπως η διείσδυση, οι πράσινες στέγες και η συγκομιδή των ομβρίων υδάτων. Το σύνολο των τεχνικών στην αρχή απλά ονομάζεται Alternativen zur Regenwasserableitung (εναλλακτικές λύσεις για την αποστράγγιση των ομβρίων υδάτων) για να απεικονίσει την αλλαγή του παραδείγματος στη διαχείριση των ομβρίων υδάτων. Όροι όπως η naturnahe Regenwasserbewirtschaftung (φυσική διαχείριση των ομβρίων υδάτων) υπογραμμίζουν το στόχο της διατήρησης της υδρολογίας πριν από την ανάπτυξη που βασίζεται στη διαχείριση των ομβρίων μέσω του ελέγχου της πηγής (Fletcher et al. 2015).

Τέλος το Σχήμα 2.2 δείχνει την σημαντική αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των διαφόρων όρων, καθώς όλοι κινούνται στην κατεύθυνση μετριασμού των αλλαγών στην υδρολογία και βελτίωση της ποιότητας των υδάτων και μείωση των ρύπων. Οι διαφορές είναι τόσο λεπτές ως προς τον τρόπο

με τον οποίο εκφράζονται αυτές οι θεμελιώδεις αρχές, με βάση την τοπική τους ανάπτυξη και το θεσμικό πλαίσιο που τείνουν να αλληλεπικαλύπτονται σε σημαντικό βαθμό (Zhou 2014).



Σχήμα 2.2: Μια πιθανή ταξινόμηση της ορολογίας της αστικής αποστράγγισης ανάλογα τον προσανατολισμό της  
Πηγή:Fletcher et al 2015.

## 2.7 Παρουσίαση των χρησιμοποιηθέντων LIDS

### 2.7.1 Πράσινες Στέγες - Green Roofs

#### Γενική περιγραφή

Οι πράσινες στέγες, επίσης γνωστές ως «κήποι στον τελευταίο όροφο», είναι μια επέκταση μιας υπάρχουσας ή πρόσφατα κατασκευασμένης οροφής που ενσωματώνει μια πολυστρωματική δομή (μεμβράνη στεγανοποίησης, αποχετευτικό σύστημα και ελαφρύ μέσο καλλιέργειας) και φυτά. Η αυξανόμενη εμφάνιση των GR σε βιώσιμα κτίρια οφείλεται κυρίως στα πολυάριθμα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, μεταξύ των οποίων και τα υδρολογικά. Είναι επανειλημμένα τεκμηριωμένο ότι οι πράσινες οροφές αποτελούν ένα εργαλείο για την αποκατάσταση της υδρολογικής ισορροπίας των αστικών υδάτων μειώνοντας και καθυστερώντας την απορροή των υδάτων (Cipolla et al. 2016). Μπορεί να είναι τοποθετημένες

πάνω από μια συμβατική επίπεδη ή κεκλιμένη οροφή, (Σχήμα 2.3) όπου απεικονίζονται με δεξιόστροφη σειρά επάνω αριστερά το Δημαρχείο του Σικάγου, το πανεπιστήμιο Υόρκης στο Τορόντο, το Δημόσιο Σχολείο Jackman στο Τορόντο και το Earth Rangers Building στο Vaughan. Οι πράσινες στέγες προσφέρονται για τις ωφέλειές τους στις πόλεις, καθώς βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση, μειώνουν τις αστικές θερμικές νησίδες και δημιουργούν χώρο για παθητική αναψυχή ή αισθητική απόλαυση. Από υδρολογικής πλευράς, η πράσινη οροφή ενεργεί σαν γκαζόν ή λιβάδι, αποθηκεύοντας όμβρια ύδατα στο αναπτυσσόμενο περιβάλλον και σε περιοχές με λίμνες. Η υπερβολική βροχόπτωση εισέρχεται σε σημεία υποπίεσης και υπερχειλίσας και μεταφέρεται στο σύστημα αποστράγγισης του κτιρίου. Μετά την καταιγίδα, μεγάλο μέρος του αποθηκευμένου νερού χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής από τα φυτά, εξατμίζεται ή απομακρύνεται αργά.



Σχήμα 2.3: Παραδείγματα πράσινων οροφών  
Πηγή: TRCA (2010)

Υπάρχουν δύο τύποι πράσινων στεγών: εντατικές και εκτεταμένες. Οι εντατικές πράσινες στέγες περιέχουν βάθος μεγαλύτερο από 15 εκατοστά του μέσου καλλιέργειας, μπορούν να φυτευτούν με βαθιά ριζωμένα φυτά και έχουν σχεδιαστεί για να διαχειρίζονται την κυκλοφορία των πεζών. Οι κατασκευές στέγης που υποστηρίζουν εντατικές πράσινες στέγες απαιτούν

σημαντικά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα, αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος και την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού. Οι εκτεταμένες πράσινες στέγες αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα καλλιεργητικού μέσου (βάθος 15 εκατοστών ή λιγότερο) με ποώδη φυτική κάλυψη.

#### Συχνοί προβληματισμοί

Οι πράσινες στέγες έχουν πολλαπλά οφέλη, όπως βελτιωμένη αισθητική στις αστικές περιοχές, μείωση της επίδρασης της αστικής θερμικής νησίδας, βελτιωμένη ποιότητα αέρα και μόνωση κτιρίων. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι προβληματισμοί όπως:

- Η ζημιά του νερού σε στέγες, καθώς η αστοχία των στεγανωτικών στοιχείων μπορεί να παρουσιάσει κίνδυνο πρόκλησης ζημιών.
- Συντήρηση της βλάστησης: Οι ακραίες καιρικές συνθήκες μπορεί να έχουν αντίκτυπο στην επιβίωση των φυτών. Η κατάλληλη επιλογή των φυτών θα συμβάλει στη διασφάλιση της επιβίωσης τους κατά τη διάρκεια των ακραίων καιρικών συνθηκών.
- Κόστος: Μια ανάλυση για τον προσδιορισμό της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας για έναν συγκεκριμένο τόπο πρέπει να περιλαμβάνει τη διάρκεια της στέγης, την εξοικονόμηση ενέργειας, τις απαιτήσεις διαχείρισης των ομβρίων, την αισθητική, την αγοραία αξία, τα φορολογικά και άλλα δημοτικά κίνητρα. Εκτιμάται ότι οι πράσινες στέγες μπορούν να επεκτείνουν τη ζωή μιας στέγης κατά 20 χρόνια, μειώνοντας την έκθεση των υλικών στέγης στον ήλιο και τις βροχοπτώσεις. Μπορούν επίσης να μειώσουν τη ζήτηση ενέργειας κατά 75% (TRCA 2010).
- Ψυχρό κλίμα: Οι πράσινες στέγες είναι μια εφικτή BMP για ψυχρά κλίματα. Το χιόνι μπορεί να προστατεύσει το στρώμα βλάστησης και μόλις αποψυχθεί, θα διαπεράσει το μέσο καλλιέργειας και είτε απορροφάται είτε αποστραγγίζεται, όπως ακριβώς θα συνέβαινε κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος βροχής (TRCA 2010).

#### Φυσική καταλληλότητα και περιορισμοί

Οι πράσινες στέγες είναι φυσικά εφικτές στις περισσότερες αναπτυξιακές καταστάσεις, αλλά θα πρέπει να προγραμματιστούν κατά το σχεδιασμό του κτιρίου. Μερικοί βασικοί περιορισμοί:

- Διαρθρωτικές απαιτήσεις: Η φέρουσα χωρητικότητα της δομής του κτιρίου και της επιλεγμένης οροφής πρέπει να επαρκεί για να στηρίξει το βάρος του εδάφους, της βλάστησης και του συσσωρευμένου ύδατος ή του χιονιού και μπορεί επίσης να χρειαστεί να στηρίξει πεζούς, σκυροδέματα κ.λπ.

- Κλίση οροφής: Οι πράσινες στέγες μπορούν να τοποθετηθούν σε στέγες με κλίσεις μέχρι 10%.
- Περιοχή αποστράγγισης και όγκος απορροής: Οι πράσινες στέγες έχουν σχεδιαστεί για να καταγράφουν τις βροχοπτώσεις που πέφτουν απευθείας στην επιφάνεια της στέγης. Δεν έχουν σχεδιασθεί για να δέχονται απορροή από άλλες περιοχές πηγής.

Η ικανότητα των πράσινων στεγών να συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων διαχείρισης των ομβρίων υδάτων συνοψίζεται στα εξής τρία σημεία. Πρώτον, συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του νερού, βοηθά στη διατήρηση του υδατικού ισοζυγίου και στον έλεγχο της διάβρωσης των καναλιών ροής (TRCA 2010).

#### Ισορροπία νερού

Οι πράσινες στέγες συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων του υδατικού ισοζυγίου μειώνοντας τους συνολικούς ετήσιους όγκους απορροής. Έχουν διεξαχθεί σημαντικές έρευνες τα τελευταία χρόνια για τον προσδιορισμό της ικανότητας μείωσης των απορροών από εκτεταμένες πράσινες στέγες. Με βάση το επικρατούμενο κλίμα για την περιοχή, συνιστάται ένας συντηρητικός ρυθμός μείωσης της απορροής για πράσινες στέγες από 45 έως 55% για την αρχική εξέταση των πρακτικών LID.

#### Ποιότητα νερού - απομάκρυνση ρύπων

Μόνο μια σειρά από μελέτες παρακολούθησης έχουν μετρήσει την απόδοση απομάκρυνσης ρύπων από πράσινες στέγες. Μια μελέτη της TRCA (Toronto and Region Conservation Authority) που συνέκρινε την απορροή της συμβατικής μαύρης οροφής με απορροή πράσινης στέγης στο Τορόντο ολοκληρώθηκε το 2006. Η μελέτη πραγματοποίησε ανάλυση ποιότητας νερού για συνολικά 21 γεγονότα κατά τη διάρκεια του 2003 και 2004. Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τα αποτελέσματα της ποιότητας του νερού. Οι τιμές φόρτωσης «διαφορά%» που εμφανίζονται στη δεξιά στήλη αντιπροσωπεύουν τη διαφορά φόρτωσης, εκφραζόμενη ως ποσοστό, μεταξύ φορτίων επιφάνειας μονάδας από τη συμβατική οροφή και την πράσινη οροφή.



Πίνακας 2.1: Συγκριτικές μειώσεις φορτίου ρύπων για πράσινη οροφή  
Πηγή: TRCA (2010)

Pollutant	Loading % Difference* (Conventional Roof vs. Green Roof)
Total Suspended Solids	89
Total Phosphorus	-248
Nitrate	91
Aluminum	69
Zinc	69
Copper	86
<i>E. Coli</i>	11
*Positive values indicate lower pollutant loadings from the green roof. Negative values indicate higher pollutant loadings from the green roof.	

#### Άλλα οφέλη

Τα οφέλη από τις πράσινες στέγες υπερβαίνουν τους συγκεκριμένους στόχους διαχείρισης των ομβρίων υδάτων σε άλλα κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη, όπως:

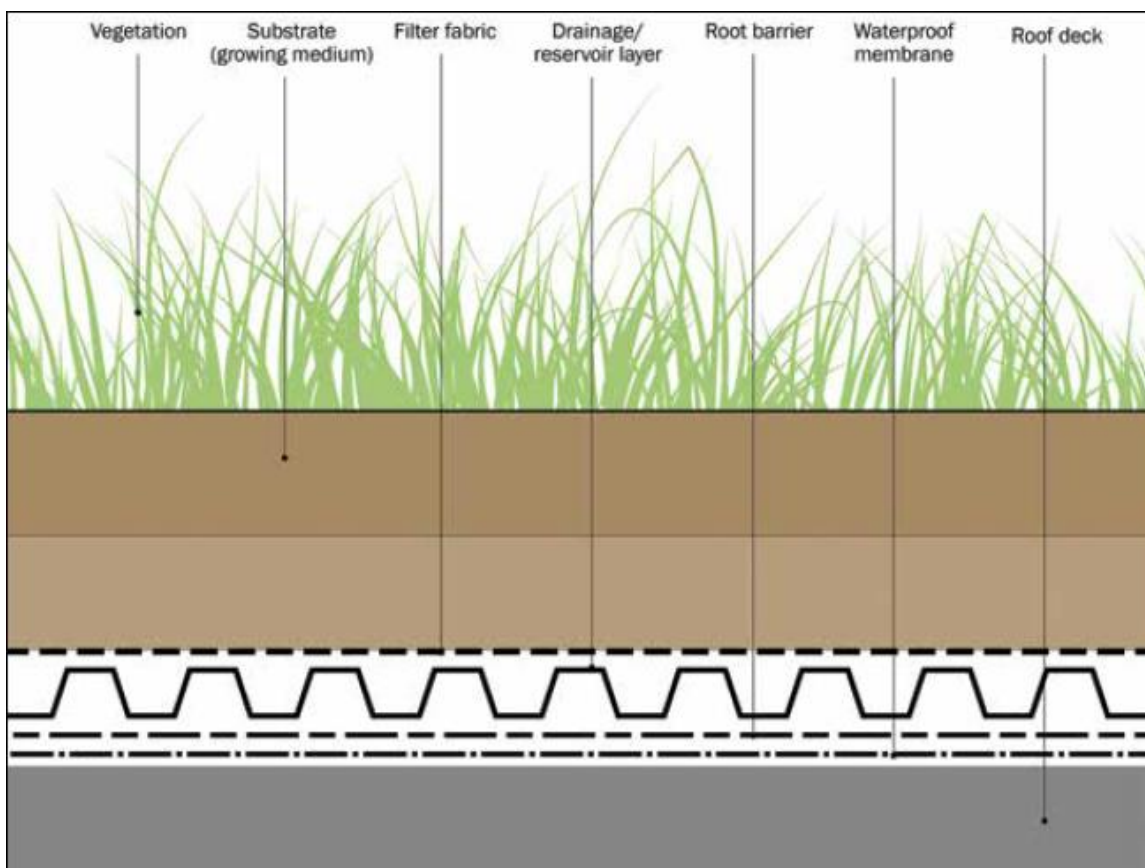
- Διατήρηση ενέργειας: Τα στρώματα του καλλιεργητικού μέσου και της βλάστησης στη στέγη μετριάζουν τις θερμοκρασίες εσωτερικού κτιρίου και παρέχουν μόνωση από τη θερμότητα και το κρύο. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανση και ψύξη του κτιρίου μειώνεται, παρέχοντας εξοικονόμηση ενέργειας στον ιδιοκτήτη (Alves et al. 2019).
- Ακουστική μόνωση: Οι πράσινες στέγες μπορούν επίσης να σχεδιαστούν για να μονώσουν το εσωτερικό του κτιρίου από εξωτερικό θόρυβο και οι ιδιότητες απορρόφησης του ήχου της πράσινης υποδομής στέγης μπορούν να κάνουν τις γύρω περιοχές πιο ήσυχες.
- Αστική θερμική νησίδα: Οι πράσινες στέγες μπορούν να μειώσουν την επίδραση της αστικής θερμικής νησίδας με ψύξη και υγρασία του περιβάλλοντος αέρα. Η θερμοκρασία της απορροής από την οροφή θα είναι επίσης χαμηλότερη, πράγμα που αποτελεί όφελος για την ευαίσθητη στη θερμοκρασία υδρόβια ζωή.
- Αισθητική και Φυσικό Περιβάλλον: Με προσεγμένη σχεδίαση, οι πράσινες στέγες μπορούν να είναι αισθητικά ευχάριστες και να βελτιώνουν τις όψεις των γειτονικών κτιρίων. Επιπλέον, η βλάστηση στον τελευταίο όροφο δημιουργεί ενδιαυχήματα για τα πουλιά.
- Μειωμένη ζήτηση στις κατάντη υποδομές: Η μείωση των όγκων απορροής που συνδέονται με τις πράσινες στέγες μπορεί να μειώσει τη ζήτηση στην υφιστάμενη κατάντη υποδομή όμβριων υδάτων και, στην περίπτωση παντοροϊκών δικτύων, να μειώσει τη συχνότητα υπερχειλίσας.

- Αυξημένη μακροβιότητα δομής στέγης: Η πράσινη οροφή μετριάξει τις ακραίες θερμοκρασίες και την έκθεση σε καταιγίδες και επεκτείνει τη μακροζωία της δομής της οροφής.

Όσον αφορά τις εφαρμογές οι πράσινες στέγες μπορούν να εγκατασταθούν σε πολλούς τύπους στέγης, από μικρές κεκλιμένες στέγες κατοικιών έως μεγάλες εμπορικές στέγες. Μερικές φορές μόνο ένα τμήμα της στέγης είναι «αφιερωμένο» σε μια πράσινη οροφή. Αυτή η βέλτιστη πρακτική διαχείρισης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε υπεραστικές περιοχές όπου ο χώρος για επιφανειακά BMP είναι περιορισμένος.

Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται τα στρώματα μιας τυπικής πράσινης οροφής. Οι πράσινες στέγες αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα που περιλαμβάνουν:

- Δομή στέγης ικανή να στηρίξει το βάρος ενός συστήματος πράσινης οροφής.
- Σύστημα μεμβράνης στεγανοποίησης σχεδιασμένο για την προστασία του κτιρίου και της δομής της οροφής.
- Ένα στρώμα αποστράγγισης που αποτελείται από ένα πορώδες μέσο ικανό να αποθηκεύει νερό για πρόσληψη φυτού.
- Ένα στρώμα φίλτρου για την αποτροπή της απόφραξης του στρώματος αποστράγγισης από τα λεπτά σωματίδια από το μέσο καλλιέργειας και τις ρίζες.
- Μέσο καλλιέργειας με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά για τη στήριξη επιλεγμένων φυτών πράσινης στέγης
- Φυτά με κατάλληλη ανοχή για τις σκληρές συνθήκες στέγης.



Σχήμα 2.4: Επίπεδα πράσινης οροφής  
Πηγή: CIRIA (2015)

#### Κόστος

Το κόστος μιας πράσινης οροφής ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο και τους παράγοντες όπως το βάθος του καλλιεργητικού μέσου, τα επιλεγμένα φυτά, το μέγεθος της εγκατάστασης, η χρήση της άρδευσης και αν πρέπει να είναι προσβάσιμες ή μη προσβάσιμες, εντατικές, ημιεντατικές ή εκτενείς. Οι εντατικές πράσινες στέγες απαιτούν συνήθως μεγαλύτερες επενδύσεις, αλλά προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της προσβασιμότητας. Μια εγκατεστημένη εκτεταμένη πράσινη οροφή με αδιάβροχες μεμβράνες μπορεί να εγκατασταθεί για \$ 10 - \$ 24 USD ανά τετραγωνικό πόδι (<https://greenroofs.org/>) ή για εκτεταμένες πράσινες στέγες είναι \$ 65 - \$ 230 CAD ανά τετραγωνικό μέτρο (TRCA 2007). Ενώ οι πράσινες στέγες απαιτούν συνήθως μεγαλύτερη αρχική επένδυση, μπορούν να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης οροφής και να μειώσουν το κόστος (TRCA 2010, CIRIA 2015, County of LA 2009 [https://www.unigroupusa.org/PDF/LA\\_County\\_LID\\_Manual.pdf](https://www.unigroupusa.org/PDF/LA_County_LID_Manual.pdf) ).

## 2.7.2 Περατά οδοστρώματα – Porous pavement

### Γενική περιγραφή

Τα περατά οδοστρώματα, αποτελούν μια εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά αδιαπέρατα οδοστρώματα. Ένα διαπερατό οδόστρωμα αποτελείται από δομικά επίπεδα με σχετικά υψηλό πορώδες, ώστε να επιτρέπουν στα όμβρια ύδατα, να διέρχονται από την επιφάνεια και τα υποκείμενα στρώματα τους, συμπεριλαμβανομένης μιας δεξαμενής, και τελικά να διεισδύουν στο εδαφος ή να εκκενώνονται σε ένα σύστημα αποστράγγισης (Chu et al. 2019). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δρόμους χαμηλής κυκλοφορίας, χώρους στάθμευσης, πλατείες πεζών και πεζόδρομους. Το διαπερατό οδόστρωμα είναι ιδανικό για χώρους με περιορισμένο χώρο για άλλα BMP επιφανειακών ομβρίων. Οι διάφοροι τύποι οδοστρώματος μπορεί να είναι:

- διαπερατές αλληλοσυνδεόμενες πλάκες σκυροδέματος (δηλ. block pavers)
- συστήματα πλέγματος από πλαστικό ή σκυρόδεμα (π.χ. δοκοί πλέγματος)
- διαπερατό σκυρόδεμα και
- πορώδη άσφαλτο



Σχήμα 2.5: Τύπος περατού πεζοδρομίου  
Πηγή: CIRIA (2015)

Ανάλογα με τα φυσικά εδάφη και τους φυσικούς περιορισμούς, το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί χωρίς υπόγεια αποστράγγιση για πλήρη διείσδυση, με υπόγεια αποστράγγιση για μερική διείσδυση ή με αδιάβροχη επένδυση και υπόγεια για μη διείσδυση ή κράτηση και διήθηση μόνο. Η διαπερατή επίστρωση επιτρέπει τη διήθηση, την αποθήκευση ή τη διήθηση της απορροής και μπορεί να μειώσει ή να εξαλείψει τις ροές των επιφανειακών ομβρίων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές αδιαπέρατες επιφάνειες οδοστρώματος όπως το σκυρόδεμα και η ασφαλτος.

#### Κοινοί προβληματισμοί

Οι συνήθεις προβληματισμοί σχετικά με τα περατά οδοστρώματα συνοψίζονται στα εξής:

- Κίνδυνος ρύπανσης των υπόγειων υδάτων: Οι περισσότεροι ρύποι στις αστικές απορροές κατακρατούνται καλά με τις πρακτικές διήθησης και τα εδάφη και συνεπώς έχουν χαμηλή έως μέτρια πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων (ωστόσο δεν πρέπει να λαμβάνουν ύδατα από περιοχές υψηλής κίνησης ούτε από σημεία ρύπανσης, π.χ. πηγές όπου οι χρήσεις γης ή οι δραστηριότητες έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ρυπασμένες απορροές, όπως περιοχές τροφοδοσίας, συντήρησης οχημάτων, υπαίθριες αποθήκες ή χώρους χειρισμού για επικίνδυνα υλικά και ορισμένες περιοχές βαρέων βιομηχανιών).
- Κίνδυνος ρύπανσης του εδάφους: Τα διαθέσιμα στοιχεία από τις μελέτες παρακολούθησης δείχνουν ότι οι μικρές κατανεμημένες πρακτικές διήθησης των ομβρίων υδάτων δεν ρυπαίνουν τα υποκείμενα εδάφη, ακόμη και μετά από περισσότερα από 10 χρόνια λειτουργίας.
- Χειμερινή λειτουργία: Για τα ψυχρά κλίματα, τα καλά σχεδιασμένα επίπεδα του οδοστρώματος μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για αντοχή, διαπερατότητας και ψύξης-απόψυξης. Επιπλέον, η εμπειρία δείχνει ότι το χιόνι λιώνει ταχύτερα σε μια πορώδη επιφάνεια λόγω της γρήγορης αποστράγγισης κάτω από την επιφάνεια του χιονιού.
- Σε Ιδιωτικό Ακίνητο: Εάν τα διαπερατά συστήματα οδοστρωμάτων είναι εγκατεστημένα σε ιδιωτικές ιδιοκτησίες, οι ιδιοκτήτες ή οι διαχειριστές ακινήτων θα πρέπει να εκπαιδεύονται στις συνήθεις ανάγκες συντήρησής τους,
- Φράξιμο: Η ευαισθησία στο φράξιμο είναι το κύριο μέλημα των διαπερατών συστημάτων επίστρωσης. Βασικές στρατηγικές για την πρόληψη της απόφραξης είναι να διασφαλιστεί ότι οι γειτονικές διεισδυτικές περιοχές διαθέτουν επαρκή κάλυψη βλάστησης και σχέδιο συντήρησης για το χειμώνα που δεν περιλαμβάνει λείανση. Για τα σκυροδέματα και τις

ασφάλτινες κατασκευές, απαιτείται τακτική συντήρηση που περιλαμβάνει σκούπισμα των οδών.

- Αλάτι οδού: Πρέπει να ληφθεί μέριμνα κατά την εφαρμογή οδικού άλατος σε διαπερατές επιφάνειες οδοστρώματος, δεδομένου ότι τα διαλυμένα συστατικά από το άλας οδού θα μεταφερθούν και στο σύστημα υπογείων υδάτων. Μια καλά αποστραγγιζόμενη επιφάνεια θα μειώσει την εμφάνιση πάγου, άρα και την απαίτηση για εφαρμογή αλατιού στο αδιαπέρατο οδόστρωμα.
- Διαρθρωτική σταθερότητα: Η συμμόρφωση με τις κατευθυντήριες γραμμές σχεδίασης για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων θα διασφαλίσει τη δομική σταθερότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βάθος του αδρανούς υλικού που απαιτείται για τη δεξαμενή αποθήκευσης ομβρίων υδάτων θα υπερβεί το βάθος που απαιτείται για τη δομική σταθερότητα. Ενισχυτικά πλέγματα μπορούν να εγκατασταθούν για εφαρμογές που υπόκεινται σε πολύ βαριά φορτία.
- Κυκλοφορία βαρέων οχημάτων: Το διαπερατό οδόστρωμα δεν χρησιμοποιείται συνήθως σε θέσεις που υπόκεινται σε βαριά φορτία. Ορισμένες διαπερατά οδοστρώματα έχουν σχεδιαστεί για βαριά φορτία και έχουν χρησιμοποιηθεί σε εμπορικές λιμενικές περιοχές φόρτωσης και αποθήκευσης.

#### Φυσική καταλληλότητα και περιορισμοί

Γενικά, διαπερατά οδοστρώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν οπουδήποτε μπορεί να εγκατασταθεί ένα παραδοσιακά πλακόστρωτο σύστημα. Εν τούτοις, τα συστήματα αυτά έχουν περιορισμούς και ενδεικτικά αναφέρονται τα ακόλουθα κριτήρια:

- Χειμερινές λειτουργίες: Η άμμος ή άλλα κοκκώδη υλικά δεν πρέπει να εφαρμόζονται ως αντιολισθητικά μέσα κατά τη χειμερινή λειτουργία, επειδή μπορούν να φράξουν γρήγορα το σύστημα.
- Τοπογραφία περιοχής: Η κλίση της διαπερατής επιφάνειας του πεζοδρομίου πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα τοις εκατό και όχι μεγαλύτερη από πέντε τοις εκατό. Η αδιαπέρατη επιφάνεια που περιβάλλει και αποστραγγίζεται στο πεζοδρόμιο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% κλίση.
- Περιοχή αποστράγγισης και όγκος κατακρημνισμάτων: Γενικά, η αδιαπέρατη περιοχή δεν πρέπει να υπερβαίνει 1-2 φορές την περιοχή του διαπερατού οδοστρώματος που δέχεται την απορροή.

- Ρύπανση Hot Spot Runoff: Για την προστασία των υπόγειων υδάτων από πιθανή ρύπανση, περιοχές πηγών όπου οι χρήσεις γης ή οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν ιδιαίτερα ρυπασμένες απορροές (π.χ. χώρους καυσίμων, χώρους συντήρησης και κατεδάφισης, περιοχές βαρέων βιομηχανιών) δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαπερατό πεζοδρόμιο.
- Περιορισμοί από κτίρια: Το διαπερατό πεζοδρόμιο πρέπει να βρίσκεται κατάντη από τα θεμέλια των κτιρίων.

#### Τυπική απόδοση

Πίνακας 2.2: Δυνατότητα του περατού οδοστρώματος να πετυχαίνει τους στόχους της διαχείρισης των όμβριων υδάτων  
Πηγή: TRCA (2010)

BMP	Water Balance Benefit	Water Quality Improvement	Stream Channel Erosion Control Benefit
Permeable pavement with no underdrain	Yes	Yes – size for water quality storage requirement	Partial – based on available storage volume and soil infiltration rates
Permeable pavement with underdrain	Partial – based on native soil infiltration rates and storage beneath the underdrain	Yes – size for water quality storage requirement	Partial – based on available storage volume and soil infiltration rates
Permeable pavement with underdrain and liner	Partial – some volume reduction occurs through evaporation	Partial – limited filtering and settling of sediments	Partial – based on available storage volume and detention time

#### Ποιότητα νερού - Χωρητικότητα απομάκρυνσης ρύπων

Όπως και άλλες πρακτικές διήθησης, η ικανότητα των διαπερατών οδοστρωμάτων για την απομάκρυνση ρύπων συνδέεται στενά με την ικανότητά τους να διηθούν την απορροή. Τα σχέδια πλήρους διήθησης είναι πιο αποτελεσματικά επειδή ελάχιστοι από τους ρύπους που δημιουργούνται στις αδιαπέρατες επιφάνειες, απομακρύνονται από την περιοχή ως επιφανειακή απορροή. Μερικά σχέδια διήθησης με υπόγεια αποστράγγιση δημιουργούν περισσότερη απορροή και, κατά συνέπεια, χρησιμοποιούνται συχνά σε μελέτες που διερευνούν την επίδραση των περατών οδοστρωμάτων στα επιφανειακά ύδατα. Αυτές οι μελέτες δείχνουν μειώσεις φορτίου άνω του 50% για τα ολικά αιωρούμενα στερεά, τα περισσότερα μέταλλα και τους υδρογονάνθρακες. Ένα σημαντικό μέρος των ρύπων συλλαμβάνεται στους πόρους της επιφάνειας και στην υποκείμενη κοκκώδη βάση των διαπερατών πεζοδρομίων.



### Άλλα οφέλη

- Χειμερινή απόδοση: Το κόστος της λειτουργίας των εκχιονιστικών μηχανημάτων μειώνεται λόγω της γρήγορης αποστράγγισης του χιονιού και του πάγου. Παρενέργειες και πλημμύρες σε χώρους στάθμευσης μειώνονται επίσης.
- Μείωση των επιπτώσεων της αστικής θερμικής νησίδας: Τα πορώδη υλικά έχουν λιγότερη θερμική αγωγιμότητα και θερμική ικανότητα από το παραδοσιακό αδιαπέραστο οδόστρωμα, μειώνοντας έτσι την επίδραση της αστικής θερμότητας.
- Ήσυχοι δρόμοι: Οι πορώδεις επιφάνειες απορροφούν την ηχητική ενέργεια και διαχέουν την πίεση του αέρα γύρω από τα ελαστικά πριν δημιουργηθεί θόρυβος. Ο θόρυβος του ελαστικού είναι χαμηλότερος σε ένταση για μια πορώδη επιφάνεια από ότι σε ένα αντίστοιχο αδιαπέρατο οδόστρωμα.



Σχήμα 2.6: Εκχιονισμός περατού οδοστρώματος  
Πηγή: TRCA (2010)

Τα διαπερατά οδοστρώματα έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές, όπου η βροχή πέφτει απευθείας στην επιφάνεια τους, αλλά μπορούν επίσης να σχεδιάζονται για να δέχονται απορροή από παρακείμενα συμβατικά πλακόστρωτα και οροφές κτιρίων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε πυκνοδομημένες περιοχές με περιορισμένο χώρο για άλλα BMPs. Η αντιμετώπιση της απορροής από τις διαπερατές περιοχές αποθαρρύνεται εξαιτίας του δυναμικού απόφραξης. Το διαπερατό οδόστρωμα μπορεί να εφαρμοστεί σε οικιστικές περιοχές σχολικούς χώρους, πάρκα, εμπορικά κέντρα και δημοτικά κτίρια.

### Κόστος

Τα αρχικά έξοδα κατασκευής για διαπερατά οδοστρώματα είναι συνήθως υψηλότερα από τις συμβατικές επιφάνειες οδοστρώματος ασφάλτου, κυρίως λόγω της παχύτερης αδρανούς βάσης



που απαιτείται για την αποθήκευση ομβρίων υδάτων. Ωστόσο, η διαφορά κόστους μειώνεται ή εξαλείφεται όταν λαμβάνεται υπόψη το συνολικό κόστος κύκλου ζωής ή το συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησης του πεζοδρομίου κατά τη διάρκεια ζωής του. Μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν και άλλες εξοικονομήσεις και οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης ανάγκης για σωλήνες αποχετεύσεων. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα οικονομικά αποδοτικά στην υπάρχουσα αστική ανάπτυξη, όπου απαιτείται επέκταση χώρου στάθμευσης, αλλά δεν υπάρχει αρκετός χώρος για άλλους τύπους BMP. Συνδυάζουν τη στάθμευση, την διείσδυση ομβρίων υδάτων, τη συγκράτηση και την κράτηση σε μία εγκατάσταση ( TRCA 2010, CIRIA 2015, County of LA 2009).

### 2.7.3 Αποσύνδεση της οροφής - Rooftop Disconnection

#### Γενική Περιγραφή

Η απλή υδρορροή αποσύνδεσης περιλαμβάνει την κατεύθυνση ροής από υδρορροές της οροφής σε μια διαπερατή περιοχή που αποστραγγίζει μακριά από το κτίριο (Σχήμα 2.7). Αυτό εμποδίζει την εισροή ομβρίων στο σύστημα αποχέτευσης ή τη διαρροή μέσω μιας "συνδεδεμένης" αδιαπέρατης επιφάνειας, όπως μιας οδού, που αποστραγγίζεται σε έναν αποχετευτικό αγωγό. Η απλή αποσύνδεση της οροφής απαιτεί ένα ελάχιστο μήκος διαδρομής ροής των 5 μέτρων στην περατή επιφάνεια.



Σχήμα 2.7: Παραδείγματα αποσυνδεδεμένων οροφών  
Πηγή: TRCA (2010)

#### Κοινοί προβληματισμοί

Ορισμένοι κοινοί προβληματισμοί σχετικά με την αποσύνδεση οροφών περιλαμβάνουν:

- Σχετικά με την Ιδιωτική Ιδιοκτησία: Εάν χορηγηθεί άδεια διαχείρισης ομβρίων για την αποσύνδεση της οροφής, οι ιδιοκτήτες ή οι διαχειριστές ακινήτων θα πρέπει να

εκπαιδεύονται για τις λειτουργίες και τις ανάγκες συντήρησής τους και ενδέχεται να υπόκεινται σε νομικά δεσμευτική συμφωνία συντήρησης.

- Θεμελιώσεις και διήθηση: Οι θέσεις αποφόρτισης των υδρορροών πρέπει να απέχουν 3 μέτρα από τα θεμέλια των κτιρίων. Αυτό μπορεί να μην είναι απαραίτητο εάν η τοπογραφία εμφανίζει κλίση 1 έως 5% μακριά από το κτίριο.
- Συμπύκνωση: Η συμπύκνωση των εδαφών στην διαπερατή περιοχή στην οποία κατευθύνονται οι υδρορροές θα μειώσει σημαντικά την αποδοτικότητα της αποσύνδεσης των υδρορροών. Η κυκλοφορία των οχημάτων και η των πεζών πρέπει να αποτρέπονται. Η φύτευση ψηλής βλάστησης γύρω από την περίμετρο της διαπερατής περιοχής είναι μια τεχνική για την αποτροπή της κυκλοφορίας στις περιοχές αυτές.
- Στάσιμο νερό και λίμναση: Οι διαπερατές περιοχές θα πρέπει να διηθούν την απορροή της οροφής στο υποκείμενο φυσικό έδαφος. Η αποσύνδεση των οροφών δεν προορίζεται για να λιμνάζει νερό, επομένως κάθε στάσιμο νερό πρέπει να διηθείται ή να εξατμίζεται εντός 24 ωρών από το τέλος κάθε συμβάντος απορροής. Εάν παρουσιαστεί μεγαλύτερη από 24 ώρες, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν δράσεις μετριασμού.

#### Φυσική καταλληλότητα και περιορισμοί

Μερικοί βασικοί περιορισμοί για την αποσύνδεση των υδρορροών περιλαμβάνουν:

- Διαθέσιμος χώρος: Η απλή αποσύνδεση απαιτεί ένα ελάχιστο μήκος διαδρομής ροής στη διαπερατή περιοχή (τουλάχιστον 5 μέτρα) και τις κατάλληλες συνθήκες εδάφους. Εάν το μήκος διαδρομής ροής είναι μικρότερο από 5 μέτρα και τα εδάφη είναι υδρολογική ομάδα C ή D, οι υδρορροές πρέπει να κατευθύνονται σε άλλη πρακτική LID, όπως σύστημα συγκομιδής ομβρίων υδάτων, soakaway, περιοχή βιοκατακράτησης ή διάτρητο σύστημα σωλήνων.
- Τοπογραφία τοποθεσίας: Οι αποσυνδεδεμένες οροφές πρέπει να εκφορτίζονται σε μια σταδιακή κλίση που μεταφέρει την απορροή μακριά από το κτίριο. Η κλίση πρέπει να είναι μεταξύ 1% και 5% και η διάταξη πρέπει να αποτρέπει τη ροή από την επανασύνδεση με παρακείμενες αδιαπέρατες επιφάνειες.
- Εδάφη: Εάν ο ρυθμός διείσδυσης των εδαφών στην διαπερατή περιοχή είναι μικρότερος από 15 mm/h (δηλαδή υδραυλική αγωγιμότητα μικρότερη από  $1 \times 10^{-6}$  cm/s), όπως προσδιορίζεται από τις μετρήσεις, πρέπει να οργωθεί σε βάθος 300 mm και να τροποποιηθεί

με κομπόστ για να επιτευχθεί οργανική περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 8 έως 15% κατά βάρος ή από 30 έως 40% κατ'όγκο.

- Περιοχή αποστράγγισης: Για απλή αποσύνδεση οροφής, η περιοχή αποστράγγισης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 100 τετραγωνικά μέτρα.
- Απορροή περιοχής υψηλού κινδύνου ρύπανσης: Η αποσύνδεση οροφών μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν οι χρήσεις γης ή οι δραστηριότητες σε επίπεδο εδάφους έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν πολύ ρυπασμένες απορροές (πχ καύσιμα οχημάτων, περιοχές συντήρησης και κατεδάφισης, χώρους υπαίθρου αποθήκευσης και χειρισμού για επικίνδυνα υλικά και ορισμένες βαριές βιομηχανικές εγκαταστάσεις), εφόσον η απορροή της οροφής διατηρείται ξεχωριστά από την απορροή από τις αδιαπέρατες επιφάνειες στο επίπεδο του εδάφους.

#### Τυπική απόδοση

Η ικανότητα της αποσύνδεσης υδρορροής για την επίτευξη των στόχων διαχείρισης των ομβρίων υδάτων συνοψίζεται στον Πίνακα 2.3. Λόγω της μερικής ικανότητάς της να εκπληρώνει τους στόχους, η αποσύνδεση πιθανότατα θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τις τροποποιήσεις του εδάφους ή με άλλη βέλτιστη πρακτική διαχείρισης.

Πίνακας 2.3: Ικανότητα της αποσύνδεσης οροφής να πετύχει τους στόχους της διαχείρισης της όμβριας απορροής  
Πηγή: TRCA (2010)

BMP	Water Balance Benefit	Water Quality Improvement	Stream Channel Erosion Control Benefit
Downspout Disconnection	Partial – depends on soil infiltration rate	Partial – depends on soil infiltration rate and length of flow path over the pervious area	Partial – depends on combination with other practices

#### Εφαρμογές

Υπάρχουν πολλές επιλογές για τη διατήρηση της απορροής στέγης έξω από το σύστημα αποχέτευσης. Ορισμένες από τις επιλογές είναι οι εξής:

- Απλή αποσύνδεση της οροφής σε μια διαπερατή περιοχή ή μια φυτεμένη λωρίδα, όπου υπάρχει επαρκές μήκος διαδρομής ροής στην διαπερατή περιοχή και κατάλληλες συνθήκες εδάφους.

- Αποσύνδεση σε μια διαπερατή περιοχή ή λωρίδα με φυτοκάλυψη που έχει οργωθεί και τροποποιηθεί με λίπασμα για τη βελτίωση του ρυθμού διείσδυσης του εδάφους και της ικανότητας αποθήκευσης υγρασίας.
- Κατεύθυνση της απορροής οροφής σε ενισχυμένο χλοοτάπητα, στεγνό έλος, περιοχή βιοκατακράτησης, soakaway ή διάτρητο σύστημα σωλήνων.
- Κατεύθυνση απορροής οροφής σε σύστημα συγκομιδής ομβρίων υδάτων (βαρέλι βροχής ή δεξαμενή) με την υπερχείλιση σε διαπερατή περιοχή, λωρίδα φίλτρου με βλάστηση, περιοχή βιοκατακράτησης, soakaway ή διαπερατό πεζοδρόμιο.

Τυπικά κριτήρια σχεδίασης

Τα rooftop disconnection πρέπει να πληρούν τα ακόλουθα κριτήρια:

- Οι διαπερατές περιοχές που χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση του πρέπει να έχουν κλίση από 1 έως 5%.
- Οι διαπερατές περιοχές πρέπει να βρίσκονται σε κλίση μακριά από το κτίριο ή η θέση εκφόρτωσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 μέτρα από το θεμέλιο του κτιρίου.
- Το μήκος διαδρομής ροής σε όλη την διαπερατή περιοχή πρέπει να είναι 5 μέτρα ή μεγαλύτερο.
- Η ταχύτητα διείσδυσης των εδαφών στην διαπερατή περιοχή πρέπει να είναι 15 mm/h ή μεγαλύτερη (δηλ., Υδραυλική αγωγιμότητα  $1 \times 10^{-6}$  cm/s ή μεγαλύτερη).
- Αν ο ρυθμός διήθησης του εδάφους στην διαπερατή περιοχή είναι μικρότερος από 15 mm/h, πρέπει να οργωθεί σε βάθος 300 mm και να τροποποιηθεί με λίπασμα για να επιτευχθεί αναλογία οργανικής περιεκτικότητας κατά 8 έως 15% κατά βάρος ή 30 έως 40 % κατ 'όγκο.
- Εάν το μήκος διαδρομής ροής σε όλη την διαπερατή περιοχή είναι μικρότερο από 5 μέτρα και τα εδάφη είναι τύπου C ή D, η απορροή στέγης πρέπει να κατευθύνεται σε άλλη πρακτική LID (π.χ. σύστημα συγκομιδής ομβρίων υδάτων, περιοχή βιοκατακράτησης κτλ.)
- Η συνολική επιφάνεια στέγης που συμβάλλει στην αποστράγγιση σε οποιαδήποτε θέση εκφόρτωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 100 τετραγωνικά μέτρα και,
- Πρέπει να τοποθετηθεί μια συσκευή διανομής επιπέδου (π.χ. μεμβράνη χαλικιών) ή συσκευή διασποράς ενέργειας στην περιοχή εκφόρτισης της υδρορροής, ώστε να κατανέμεται η απορροή όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα στην διαπερατή περιοχή.

## Κόστος

Για νέα ανάπτυξη, δεν υπάρχει πρόσθετο κόστος που να συνδέεται με τις απλές αποσυνδέσεις των οροφών σε διαπερατές περιοχές. Όταν ο ρυθμός διείσδυσης εδάφους μετά την κατασκευή είναι μικρότερος από 15 mm/h ή η υδραυλική αγωγιμότητα κάτω από κορεσμένες συνθήκες πεδίου είναι μικρότερη από  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, όπως προσδιορίζεται από τις μετρήσεις, τότε θα προκύψει επιπρόσθετο κόστος που σχετίζεται με την επεξεργασία του εδάφους και τις τροποποιήσεις με λιπάσματα. Η αποσύνδεση της στέγης από το αποχετευτικό σύστημα στις υπάρχουσες εξελίξεις κοστίζει συνήθως \$ 100 ανά υδρορροή, συμπεριλαμβανομένων υλικών (π.χ. υλικό μείωσης της εκτόξευσης του νερού και επέκταση αγωγού) (TRCA 2010).

### 2.7.4 Μελέτες και παραδείγματα χρήσης LIDs

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν κάποια παραδείγματα εφαρμογής και μελέτης πράσινων οροφών και περατών οδοστρωμάτων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Οι πράσινες στέγες, όπως έχει ήδη αναφερθεί επηρεάζουν σημαντικά την αύξηση της κατακράτησης νερού και επομένως τη διαχείριση του βρόχινου νερού στις αστικές περιοχές. Στην Πολωνία, όπως και σε πολλές άλλες ευρωπαϊκές χώρες, προκύπτουν υπερβολικά όμβρια ύδατα από τις χιονοπτώσεις και τις έντονες βροχοπτώσεις συμβάλλοντας στην ανάπτυξη τοπικών πλημμυρών σε αστικές περιοχές.

Για αυτό το λόγο οι Adamiak et al. (2013) θεωρούν ότι είναι πιθανότερο να χρησιμοποιηθούν και οι πράσινες στέγες σε αυτή τη χώρα. Έτσι μελέτησαν την λειτουργία και απόδοση των πράσινων στεγών και η προσπάθεια τους συνοψίζεται στην αξιολόγηση της ακρίβειας της μονάδας LID του SWMM να αντικατοπτρίζει το μετασχηματισμό βροχόπτωσης-απορροής για τις πράσινες στέγες. Οι πειραματικές τοποθεσίες έγιναν με τη μορφή τεσσάρων οροφών σε πλατφόρμες με εξωτερικές διαστάσεις 2,40, 1,20 και 0,35 m (μήκος, πλάτος, ύψος) και κλίση 7,7%. Οι πλατφόρμες τοποθετήθηκαν στην οροφή του Επιστημονικού και Εκπαιδευτικού Κέντρου του Πανεπιστημίου Περιβάλλοντος και Επιστημών Ζωής, Βρότσλαβ, Πολωνία. Το κτίριο αυτό βρίσκεται στο κέντρο της πόλης, κοντά στον εθνικό δρόμο. Το μοντέλο έχει επαληθευτεί με βάση τα αποτελέσματα μετρήσεων που προέκυψαν από την παρακολούθηση της βροχόπτωσης και της απορροής που πραγματοποιήθηκε στο Wrocław σε πειραματικές τοποθεσίες εξοπλισμένες με εκτεταμένες πράσινες στέγες. Οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν για 13 βροχοπτώσεις.

Τέλος, οι δοκιμές που διεξήχθησαν για τον Ιούνιο έως τον Νοέμβριο 2009 και το 2010 για τρεις διαφορετικούς τύπους πράσινων στεγών επιβεβαίωσαν τη θετική τους επίδραση στη μείωση του όγκου, των μέγιστων τιμών έντασης και στην καθυστέρηση της εμφάνισης της απορροής. Ελαφρές διαφορές στα αποτελέσματα που λαμβάνονται για διάφορες δομές μπορεί να υποδηλώνουν ότι τα αντικείμενα της απλούστερης δομής που χρησιμοποιήθηκε, μπορεί να είναι η βέλτιστη λύση όσον αφορά την ανακούφιση ενός συστήματος αποστράγγισης.

Οι πράσινες στέγες όμως χρησιμοποιούνται και σε πιο ζεστά κλίματα. Η λεκάνη της Μεσογείου είναι εξαιρετικά ευάλωτη στην αλλαγή του κλίματος και μία από τις περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο από τη ζήτηση νερού από τον άνθρωπο. Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι Chenot et al. (2017), ενώ οι πράσινες στέγες όλο και περισσότερο δημιουργούνται τόσο για αισθητικούς λόγους όσο και για τον περιορισμό της ρύπανσης και των αστικών απορροών, είναι οι ίδιες πολύ απαιτητικές για νερό. Η επιτυχής εγκατάσταση της πράσινης οροφής εξαρτάται από την εγκατάσταση της βλάστησης και το υπόστρωμα είναι το βασικό στοιχείο: φυλάσσει το νερό και παρέχει τα θρεπτικά συστατικά και τη φυσική υποστήριξη που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών.

Δεδομένου ότι οι τυπικές μεσογειακές φυτικές ομάδες δεν απαιτούν συντήρηση, η μελέτη αυτή επιδίωξε να αναπτύξει τεχνικές για τη δημιουργία οριζόντιων πράσινων οροφών, που να μην χρειάζονται συντήρηση και νερό για την αξιοποίηση τους από δημόσια ή ιδιωτικά κτίρια σε ένα μεσογειακό περιβάλλον. Η καινοτόμος πτυχή αυτής της μελέτης έγκειται στη δημιουργία δύο μιγμάτων εδάφους, λεπτών στοιχείων (πηλός και λάσπης) και χονδροειδών στοιχείων (βότσαλα όλων των μεγεθών), σε δύο διαφορετικά πάχη, για την εκτίμηση της ανάπτυξης της βλάστησης. Η παρακολούθηση της υγρασίας του υποστρώματος πραγματοποιήθηκε και συσχετίστηκε με τοπικές μετρήσεις βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και του φθινοπώρου. Ο πειραματικός χώρος βρισκόταν στη Μεσόγειο της Νοτιοανατολικής Γαλλίας, στις στέγες του Πανεπιστημίου και του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Αβινιόν. Ο χώρος είναι ευνοϊκός για την εγκατάσταση πράσινης οροφής, παρέχοντας: (1) μια επίπεδη οροφή (με πολύ μικρή κλίση που επιτρέπει την εκκένωση του βρόχινου νερού) και (2) υψηλή έκθεση στον ήλιο. Το πειραματικό πρωτόκολλο περιελάμβανε εκτεταμένες πράσινες στέγες αποτελούμενες από τέσσερις στρώσεις: 1) την οροφή του κτιρίου (σκυρόδεμα), 2) το σύστημα αποστράγγισης 3 ένα φίλτρο γεωυφάσματος που συγκρατούσε τα λεπτά σωματίδια του υποστρώματος και επέτρεψε τη ροή του νερού που περιέχεται στο υπόστρωμα, 4) το υπόστρωμα είναι απαραίτητο για την ορθή

ανάπτυξη της βλάστησης. Στη μελέτη αυτή, βασικά ευρήματα είναι: 1) ότι οι επεξηγηματικές μεταβλητές που επηρεάζουν την υγρασία των υποστρωμάτων είναι κυρίως το βάθος και η σύνθεση των μιγμάτων υποστρωμάτων σε σχέση με το χρόνο που πέρασε από την τελευταία κατακρήμνιση, 2) ότι η βλάστηση επηρεάζει την υγρασία σε μικρότερο βαθμό αλλά επηρεάζεται από τη σύνθεση και το βάθος των υποστρωμάτων. Τέλος, για την καλύτερη ανάπτυξη της βλάστησης, θα συνιστούσαν ένα πάχος υποστρώματος 15 cm που αποτελείται κυρίως από άργιλο και λάσπη (75% αργιλώδους αργιλίου και 25% βότσαλο άμμου) για την τοποθέτηση πράσινων στεγών με τέτοια υποστρώματα σε ένα μεσογειακό κλίμα (Chenot et al. 2017).

Η κατακράτηση νερού των πράσινων στεγών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (π.χ. τοπικό κλίμα) και οι μετρήσεις παραμένουν ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της απόδοσής τους. Η προσομοίωση της κατακράτησης της πράσινης οροφής από ένα υδρολογικό μοντέλο είναι μια επιλογή για την αξιολόγηση των δυνητικών οφελών τους πριν από την εφαρμογή. Στην εργασία των Krebs et al. (2016) αξιολογήθηκε η ικανότητα της τότε πρόσφατα εισαγόμενης μονάδας πράσινης στέγης LID του SWMM να αντιγράφει την απορροή από τις δοκιμασμένες κλίνες δοκιμών πράσινης οροφής κάτω από τις σκανδιναβικές κλιματολογικές συνθήκες. Διεξήχθη ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων βαθμονόμησης. Οι πειραματικές πράσινες στέγες, κάθε 2m<sup>2</sup> μεγέθους (1 × 2 m), δημιουργήθηκαν στις αρχές Ιουλίου 2013 στην πόλη Lahti της νότιας Φινλανδίας. Διεξήχθησαν συνεχείς προσομοιώσεις για την περίοδο καλλιέργειας (Μάιος-Οκτώβριος) 2 ετών, συμπεριλαμβανομένων των περιόδων μεταξύ των περιόδων που είναι σημαντικές για την ανάκτηση της κατακράτησης της πράσινης στέγης. Η ευαισθησία των παραμέτρων της μονάδας LID του SWMM αναλύθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία εκτίμησης της γενικευμένης αβεβαιότητας πιθανότητας (GLUE) πριν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Το μοντέλο έδειξε μια συνολικά αποδεκτή απόδοση και τα αποτελέσματα υποδεικνύουν τη σημασία της ακριβούς εκτίμησης των πιθανών ποσοστών εξατμισοδιαπνοής για περιόδους μεταξύ των περιπτώσεων, η οποία είναι απαραίτητη για την αναπαράσταση της ικανότητας συγκράτησης (Krebs et al. 2016).

Επί του παρόντος, πολλοί ιταλικοί περιφερειακοί και τοπικοί κανονισμοί (όπως στην Αυτόνομη Επαρχία του Bolzano, στην επαρχία Ρίμινι και στην πόλη της Μπολόνια μέσω του Urban Municipal Regulation, RUE) προωθούν τη χρήση των GR και άλλων πράσινων τεχνολογιών λόγω της υδρολογικά και περιβαλλοντικά οφέλη, παρέχοντας κίνητρα όπως έκτακτες φορολογικές ελαφρύνσεις (Cipolla et al. 2016). Η μελέτη των Cipolla et al. (2016) παρουσίασε τα

αποτελέσματα μιας δραστηριότητας παρακολούθησης πλήρους κλίμακας μιας εκτεταμένης πράσινης οροφής στη Μπολόνια (Ιταλία). Η περιοχή μελέτης αφορά μια πλήρη GR και μια παρακείμενη αδιαπέρατη οροφή, και οι δύο τοποθετημένες πάνω από το εργαστήριο LAGIRN της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου της Μπολόνια (UNIBO), που χρησιμοποιήθηκαν ως case study. Οι συνεχείς καιρικές συνθήκες και η απορροή συλλέχθηκαν μεταξύ Ιανουαρίου και Δεκεμβρίου 2014, όντας αποτέλεσμα 69 γεγονότων βροχών κατάλληλες για τη μελέτη. Η μελέτη χρησιμοποιεί τα δεδομένα πεδίου για τη βαθμονόμηση και επικύρωση ενός αριθμητικού μοντέλου που πραγματοποιήθηκε με το εμπορικό λογισμικό SWMM5.1. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μακροπρόθεσμης υδρολογικής απόκρισης, για ένα χρόνο, της ίδιας πλήρους κλίμακας εκτεταμένης πράσινης οροφής και για τη σύγκρισή της με μια παρακείμενη αδιαπέραστη οροφή του ίδιου μεγέθους. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επιβεβαιώνουν το ρόλο των πράσινων στεγών στην αποκατάσταση του φυσικού καθεστώτος νερού μειώνοντας τον ετήσιο όγκο απορροής. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της πειραματικής παρακολούθησης της πράσινης οροφής και της προσομοίωσης SWMM απέδειξε ότι το προτεινόμενο μοντέλο έχει καλές δυνατότητες προσομοίωσης της απορροής ομβρίων υδάτων από πράσινες στέγες κατά τη διάρκεια του έτους, όπως αποδεικνύεται από τις αρκετά υψηλές τιμές του NSE και τη χαμηλή τιμή RSR τόσο στη φάση βαθμονόμησης όσο και στην επαλήθευση. Επιπλέον, η χαμηλή διαφορά (<9%) στη συνολική συγκράτηση μεταξύ των 69 μετρημένων και προσομοιωμένων συμβάντων επιβεβαιώνει την καταλληλότητα του μοντέλου για μακροχρόνιες προσομοιώσεις. Η προτεινόμενη προσέγγιση μοντελοποίησης καταδεικνύει ότι το SWMM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων LID (Low Impact Development) και, συνεπώς, για την υποστήριξη τοπικών αρχών ή σχεδιαστών στην αξιολόγηση της υδρολογικής απόδοσης των πράσινων στεγών (Cipolla et al. 2016).

Συνεχίζοντας σε μια άλλη μελέτη διερευνήθηκε η επίδραση της εφαρμογής των LID στην ποιότητα του νερού (Gülbas et al. 2018). Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ποιότητας νερού για την λεκάνη απορροής Alibeyköy στην Κωνσταντινούπολη της Τουρκίας, χρησιμοποιώντας το SWMM EPA και ενσωματώθηκε στο βαθμονομημένο υδρολογικό μοντέλο. Η συγκεκριμένη λεκάνη βρίσκεται στην ευρωπαϊκή πλευρά της Κωνσταντινούπολης. Έχει έκταση αποχέτευσης 161 km<sup>2</sup> και παρέχει σημαντικό μέρος του πόσιμου νερού της Κωνσταντινούπολης μέσω υπάρχουσας δεξαμενής. Τα TSS εισάγονται στο μοντέλο χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες συσσώρευσης και αποθέματος. Στη συνέχεια, στο μοντέλο χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι LID. Η συγκέντρωση TSS για την τρέχουσα αστικοποίηση με και χωρίς εφαρμογή LID



προσομοιώνεται με αδύναμα και δυνατά γεγονότα βροχόπτωσης χρησιμοποιώντας το υδρολογικό μοντέλο και το μοντέλο ποιότητας νερού. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση πέντε διαφορετικών σεναρίων. Ενώ το πρώτο σενάριο παρουσιάζει την επίδραση των συνδυασμένων τύπων LID στη συγκέντρωση TSS, τα υπόλοιπα από τα τέσσερα σενάρια παρουσιάζουν την ξεχωριστή επίδραση κάθε τύπου LID, δηλαδή bioretention, vegetative swales, permeable pavements, and infiltration trenches. Παρατηρείται ότι η εφαρμογή LID στην λεκάνη απορροής του Alibeyköy έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της συγκέντρωσης TSS μετά την εφαρμογή των BMP τύπου LID. Τα περατά οδοστρώματα (που μας ενδιαφέρουν) έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην απομάκρυνση των TSS τόσο στην περίπτωση συνδυαστικών όσο και μεμονωμένων εφαρμογών. Ενώ η επίδραση των τεσσάρων διαφορετικών LIDs δεν διαφέρουν σημαντικά σε περίπτωση μικρής καταιγίδας, η διαφορά μεταξύ των επιδράσεων των διαφόρων LIDs είναι πιο έντονη σε περίπτωση ισχυρής καταιγίδας. Τα bioretention και vegetative swales είναι ελαφρώς πιο αποτελεσματικά από ότι τα περατά πεζοδρόμια στην απομάκρυνση του TSS κάτω από ισχυρές βροχοπτώσεις (Gülbas et al. 2018).

Οι πλημμύρες στις αστικές περιοχές συμβαίνουν συχνά σε πολλές περιοχές της Κίνας. Για να μειωθούν οι απώλειες που προκαλούνται από τις πλημμύρες στις πόλεις, πραγματοποιήθηκε σε πολλές κινεζικές πόλεις η πρακτική της «πόλης σφουγγάρι» (SPC) και η εφαρμογή αειφόρων μέτρων. Ωστόσο, οι πλημμύρες στις πόλεις επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως το κλίμα, τα χαρακτηριστικά κάλυψης της γης και τα κοντινά δίκτυα ποταμών, επομένως είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των μέτρων LID. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε το SWMM για την προσομοίωση ιστορικών αστικών βροχοπτώσεων στην ορεινή περιοχή Fragrance Hills του Πεκίνου της Κίνας. Ακολουθώντας, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις για να εκτιμηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάστηκαν τα μέτρα LID (concave greenbelt, permeable pavement, bio-retention, vegetative swales και comprehensive measures) στη μείωση της απορροής των αστικών περιοχών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα LID, και τα περατά οδοστρώματα, είναι αποτελεσματικά για τον έλεγχο της επιφανειακής απορροής των γεγονότων καταιγίδας με περιόδους επαναφοράς μικρότερες από πέντε χρόνια, ιδιαίτερα για γεγονότα ενός έτους. Τα περατά οδοστρώματα ήταν αποτελεσματικά και μπορούν να έχουν σίγουρα κάποια επίδραση στην τυπική υπολεκάνη, αλλά σε όλες τις εκτιμημένες περιπτώσεις, τα comprehensive measures και concave greenbelts είναι οι πιο αποτελεσματικά. Αυτό έδειξε ότι τα μέτρα LID είναι λιγότερο αποτελεσματικά για την απομάκρυνση των

περισσότερων γεγονότων καταιγίδας σε μια ορεινή, χαμηλού υψομέτρου περιοχή (Luan et al. 2017).

Τέλος σε αυτή την εργασία, αναλύεται στην κλίμακα των αστικών περιοχών η εφαρμογή συστημάτων χαμηλού αντίκτυπου (LID) ως λύσεις ελέγχου πηγής που συμβάλλουν στην αποκατάσταση των κρίσιμων συνιστωσών των φυσικών συνθηκών ροής. Η υδρολογική απόκριση μιας μικρής αστικής λεκάνης διερευνάται υπό διαφορετικά σενάρια μετατροπής χρήσης γης. Αυτές οι μετατροπές περιλαμβάνουν και την τοποθέτηση πράσινων στεγών και διαπερατών οδοστρωμάτων. Η αστική λεκάνη του Colle Ometti, στην πόλη της Γένοβας (Ιταλία) επιλέχθηκε ως τόπος δοκιμής για την υδρολογική μοντελοποίηση των σεναρίων μετατροπής χρήσης γης. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το SWMM EPA. Το σενάριο «να μην κάνουμε τίποτα» βαθμονομήθηκε και επικυρώθηκε με βάση τις μετρήσεις πεδίου, ενώ οι μονάδες ελέγχου LID βαθμονομήθηκαν και επικυρώθηκαν βάσει μετρήσεων εργαστηριακών δοκιμών. Οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν με τη χρήση των συνθετικών υετογραφημάτων που παρήχθησαν για τρεις διαφορετικές περιόδους επιστροφής ( $T=2, 5$  και  $10$  έτη). Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα των λύσεων LID, τόσο για τις πράσινες στέγες όσο και για τα περατά οδοστρώματα, ακόμη και για τη βροχή περιόδου επαναφοράς  $10$  χρόνων (Palla et al. 2015).

## 2.8 Οικονομική ανάλυση των LIDs

### 2.8.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αστικοποίηση μετατρέπει τις φυσικές εκτάσεις σε αστικές υποδομές (π.χ. κτίρια, χώροι στάθμευσης και δρόμοι). Η αύξηση της αδιαπέρατης περιοχής μειώνει τη διείσδυση και την επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων, αυξάνοντας έτσι την απορροή και τις πλημμύρες κατά τη διάρκεια καταιγίδων και επίσης μειώνοντας την περιβαλλοντική ροή και την αποθήκευση των υπόγειων υδάτων κατά τη διάρκεια ξηρές περιόδους. Αστικοποίηση επίσης σημαντικά υποβαθμίζει την ποιότητα του νερού (Chui et al. 2016).

Η διαχείριση των ομβρίων υδάτων τα τελευταία χρόνια έχει επικεντρωθεί όλο και περισσότερο στις τεχνικές Low Impact Development (LID). Παρόλο που έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα των LID σε αρκετές περιπτώσεις, εξακολουθούν να υφίστανται εμπόδια στην ευρύτερη εφαρμογή τους σε νέες εκτάσεις γης, συμπεριλαμβανομένου του δυνητικά αυξημένου κόστους εφαρμογής και συντήρησής τους (Joksimovic et al. 2014).

Γενικότερα οι πράσινες-μπλε υποδομές (GBI) στους αστικούς χώρους προσφέρουν πολλά επιπρόσθετα οφέλη (co-benefits) εκτός από τη μείωση του κινδύνου πλημμύρας, όπως η εξοικονόμηση νερού, η εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της λιγότερης χρήσης της ψύξης, της βελτίωσης της ποιότητας του αέρα και της δέσμευσης του άνθρακα. Παραδοσιακά, αυτά τα παράγωγα οφέλη δεν συμπεριλήφθηκαν στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας (Alves et al. 2019).

Παρακάτω λοιπόν θα παρουσιαστούν κάποιες μελέτες, σχετικά με τα κόστη εφαρμογής και τα οφέλη των LID-GI-BMPs και ούτω καθεξής και πως αυτά τα δεδομένα θα άλλαζαν τις αποφάσεις που λαμβάνονται για την εφαρμογή ή όχι πράσινων και μπλε μεθόδων έναντι των γκρι από τους αρμόδιους φορείς.

### 2.8.2 Μελέτες Κόστους Απόδοσης Εφαρμογής LID

Παρόλο που έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα των LID σε αρκετές περιπτώσεις, εξακολουθούν να υφίστανται εμπόδια στην ευρύτερη εφαρμογή τους σε νέες εκτάσεις γης, συμπεριλαμβανομένου του δυνητικά αυξημένου κόστους εφαρμογής και συντήρησης τους.

Στην Καναδική επαρχία του Οντάριο, οι Αρχές Διατήρησης έχουν αναλάβει την καθοδήγηση σχετικά με τα LID, τα εργαλεία αξιολόγησης και τα σχέδια επίδειξης, δύο από τα οποία παρείχαν ένα έγγραφο καθοδήγησης που περιγράφει δέκα διαφορετικές πρακτικές που κυμαίνονται από την αποσύνδεση της οροφής μέχρι τα διάτρητα συστήματα σωλήνων. Επιπλέον, έχει προσφερθεί πρόσφατα ένα λεπτομερές εργαλείο κοστολόγησης, το οποίο επιτρέπει στους σχεδιαστές να πραγματοποιούν ένα κόστος κύκλου ζωής των διαφόρων πρακτικών LID και να αξιολογούν την αποδοτικότητα του κόστους τους. Στόχος του έργου που συζητήθηκε σε αυτό το έγγραφο ήταν η αξιοποίηση των εργαλείων καθοδήγησης και κοστολόγησης και η εκτίμηση της αποδοτικότητας ως προς το κόστος πολλών πρακτικών και των συνδυασμών τους για τον έλεγχο της απορροής από μονάδα ανάπτυξης μικτής χρήσης στο νότιο Οντάριο. Το έργο περιελάμβανε τον εντοπισμό των ευκαιριών για εφαρμογή LID εντός του προγραμματισμένου χώρου δράσης, την ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων αναφοράς και LID και την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων επιδόσεων και κόστους, προκειμένου να εντοπιστούν οι πιο οικονομικά αποδοτικές επιλογές.

#### Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην πόλη του Λονδίνου, Οντάριο και αφορούσε ένα χώρο 30 στρεμμάτων, ο οποίος περιβάλλεται από υπάρχουσες και μελλοντικές κυρίως κατοικίες. Το

μεγαλύτερο μέρος του χώρου χρησιμοποιείται για γεωργικούς σκοπούς. Ο χώρος σχεδιάζεται ως μια βιώσιμη, μικτής χρήσης, πεζοδρομημένη κοινότητα που ενσωματώνει μεσαίες και υψηλής πυκνότητας οικιστικές, εμπορικές και ανοιχτού χώρου χρήσεις, καθώς χρήσεις επαγγελματικών γραφείων. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό της τοποθεσίας είναι ότι βρίσκεται κοντά σε έναν κολπίσκος που είναι ένας από τους τελευταίους τύπους αλιείας με ψυχρό νερό στην περιοχή, απαιτώντας τα λύματα διαχείρισης των ομβρίων που εξασφάλιζαν ότι το δυτικό τμήμα της ανεπτυγμένης περιοχής παρέχει επαρκή διείσδυση για τη διατήρηση των ρών βάσης στον ποταμό, ενώ το ανατολικό τμήμα θα στραγγίξει υφιστάμενη λίμνη διαχείρισης ομβρίων.

Σε αυτό το ερευνητικό έργο, το PCSWMM χρησιμοποιήθηκε για μακροχρόνια συνεχή υδρολογική προσομοίωση της περιοχής μελέτης. Το PCSWMM είναι ένα σύστημα υποστήριξης χωρικών αποφάσεων για το EPA SWMM.

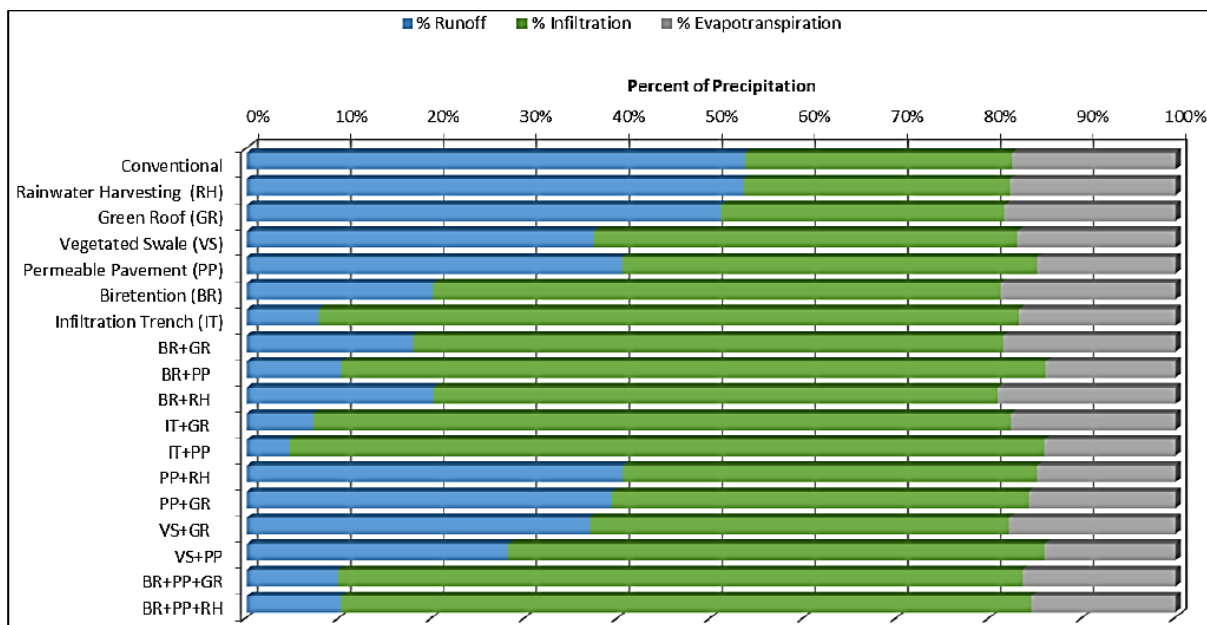
Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας έξι τύπους LID: πράσινη στέγη, διαπερατό οδόστρωμα, τάφρο διήθησης, χώρους βιοκατακράτησης, κανάλια βάστησης και συλλογή βρόχινου νερού, καθώς και 11 συνδυασμούς αυτών. Οι συνδυασμοί που μελετήθηκαν παρατίθενται παρακάτω:

- Vegetative Swale + Porous Pavement (VS+PP)
- Vegetative Swale + Green roof (VS+GR)
- Porous Pavement + Green Roof (PP+GR)
- Porous Pavement + Rain Water Harvesting (PP+RH)
- Infiltration Trench + Porous Pavement (IT+PP)
- Infiltration Trench + Green Roof (IT+GR)
- Bioretention Cell + Green Roof (BR+GR)
- Bioretention Cell+ Rain Water Harvesting (BR+RH)
- Bioretention Cell + Porous Pavement (BR+PP)
- Bioretention Cell + Porous Pavement + Green Roof (BR+PP+GR)
- Bioretention Cell + Porous Pavement + Rain Water Harvesting (BR+PP+RH)

#### Μείωση Απορροής

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ξεκάθαρα στο Σχήμα 2.8 ότι τα LIDs και οι συνδυασμοί τους συμβάλλουν στην αποκατάσταση του υδρολογικού προφίλ της υφιστάμενης θέσης αυξάνοντας την διείσδυση και μειώνοντας την απορροή, αν και καμία από τις

εξεταζόμενες επιλογές δεν ήταν ικανή να αποκαταστήσει πλήρως την προ-ανάπτυξη διήθηση. Όπως αναμενόταν, η εφαρμογή ενός συνδυασμού μέτρων LID ήταν πιο αποτελεσματική στον έλεγχο της επιφανειακής απορροής σε σύγκριση με την ξεχωριστή εφαρμογή LID.



Σχήμα 2.8: Ισορροπία νερού για διαφορετικούς συνδυασμούς LID  
Πηγή: Joksimovic et al. (2014)

### Κόστος

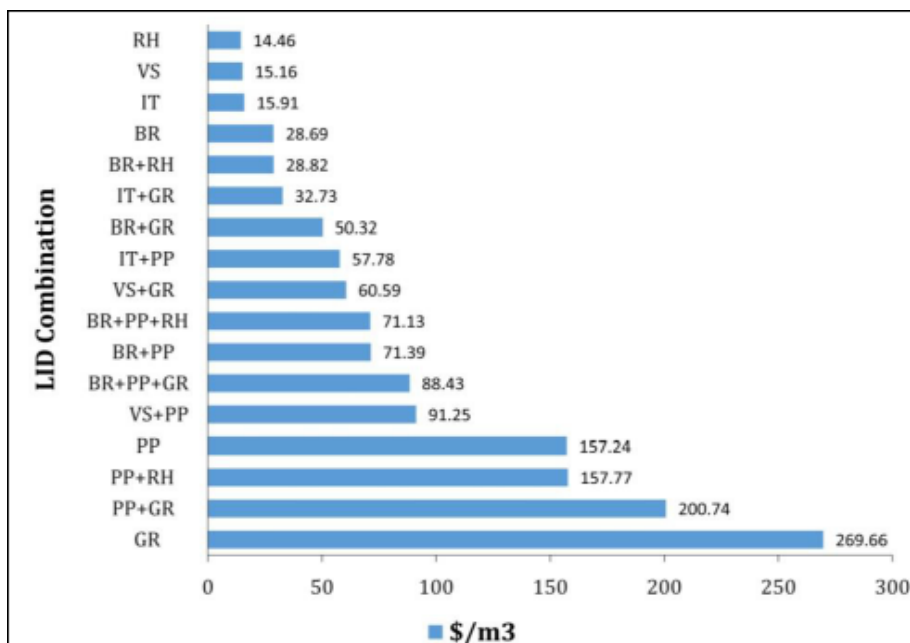
Τα κόστη των LID υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο κοστολόγησης, και με βάση την περιοχή των LID και την περιοχή που συμβάλλει ροή σε κάθε LID. Το επίκεντρο της μελέτης ήταν ο καθορισμός του κόστους κεφαλαίου, παρόλο που το εργαλείο είναι ικανό να υπολογίσει το κόστος του κύκλου ζωής, καθώς σκοπός ήταν να συγκριθούν τελικά οι επιλογές LID με την προτιμώμενη εναλλακτική λύση που αφορούσε την κατασκευή εγκαταστάσεων συγκεντρωτικής κατακράτησης και διήθησης. Το υπολογιζόμενο κόστος κεφαλαίου των LID για τον προτεινόμενο χώρο παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2.4: Κόστος κεφαλαίου για την εφαρμογή ατομικών LID  
Πηγή: Joksimovic et al. (2014)

LID measure	Capital cost (\$)
Bioretention cell	2,024,786
Permeable pavement	4,308,214
Infiltration trench	1,497,319
Vegetated swale	523,985
Green roof (on commercial buildings)	1,620,802
Rainwater harvesting (in single family housing)	16,706

### Κόστος απόδοσης

Η αποτελεσματικότητα κόστους των LIDs και των συνδυασμών αυτών που διερευνώνται στην παρούσα μελέτη αναφέρεται για πρώτη φορά σε σχέση με το κόστος ανά  $\text{m}^3$  της μείωσης της απορροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Η επιλογή συγκομιδής βρόχινου νερού είχε το χαμηλότερο κόστος συνολικά, καθώς το κόστος κεφαλαίου είναι απλά ο εφοδιασμός με μια δεξαμενή συλλογής νερού σε κάθε νοικοκυριό στην περιοχή μελέτης. Ομοίως, το κόστος μονάδας κάθε συνδυασμού LID που περιλαμβάνει συλλογή βρόχινου νερού δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη ενσωμάτωση του λόγω χαμηλού κόστους και απόδοσης. Σημειώνεται ότι η παραδοχή που γίνεται εδώ είναι ότι η αποθηκευμένη απορροή οροφής θα χρησιμοποιηθεί μόνο για άρδευση των άμεσων χώρων πρασίνου χωρίς την ανάγκη οποιασδήποτε επεξεργασίας, καθώς το κύριο μέλημα αυτής της συγκεκριμένης εξέλιξης ήταν η μεγιστοποίηση των διηθημένων όγκων. Το εργαλείο κοστολόγησης χρησιμοποιήθηκε επίσης για να αξιολογήσει το κόστος χρήσης του βρόχινου νερού για εσωτερικές χρήσεις νερού, απαιτώντας συστήματα επεξεργασίας και εσωτερικές σωληνώσεις και το κόστος ήταν σημαντικά υψηλότερο.



Σχήμα 2.9: Σύγκριση του κόστους ανά μονάδα όγκου μείωσης της απορροής με χρήση διαφορετικών LID

Πηγή: Joksimovic et al. (2014)

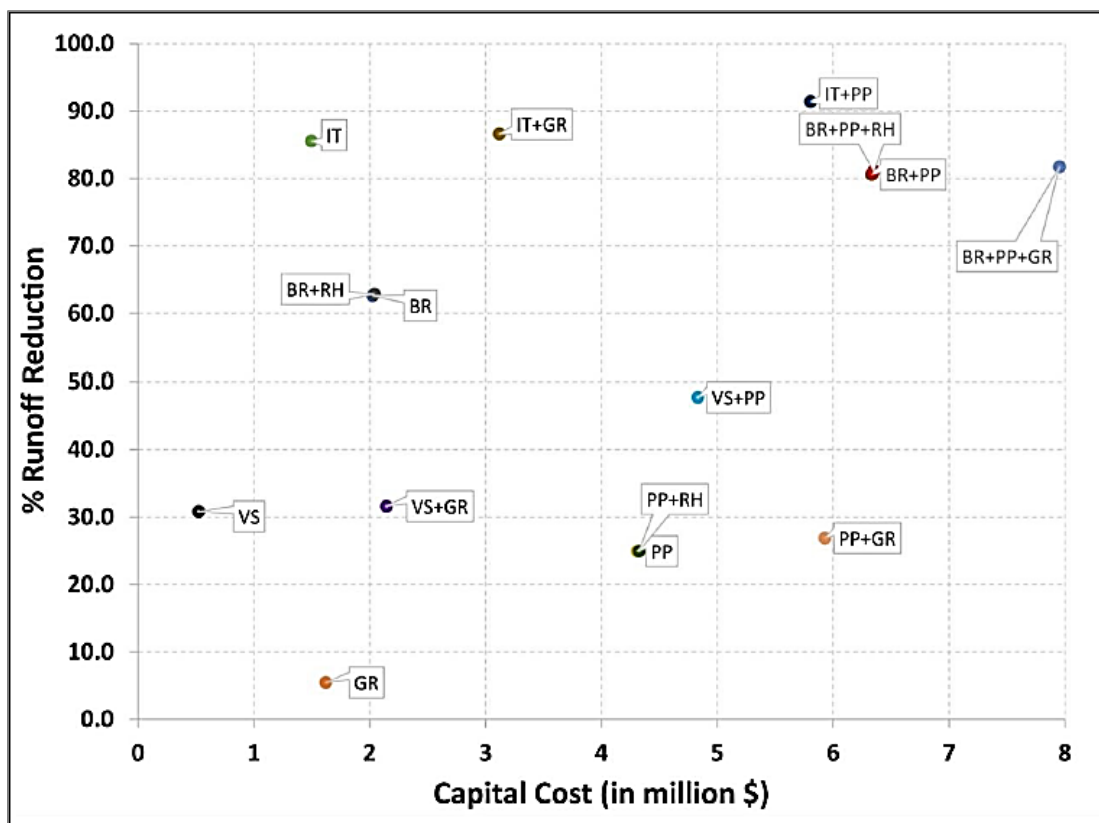
Αν και το υπολογιζόμενο κεφαλαιουχικό κόστος των τάφρων διήθησης ήταν σχεδόν τριπλάσιο εκείνου των ανοικτών καναλιών βλάστησης, η απόδοσή τους στον έλεγχο απορροής ήταν

υψηλότερη σε σχέση με αυτό το κόστος. Ως αποτέλεσμα, το μοναδιαίο κόστος αυτών των δύο τεχνολογιών ήταν σχεδόν το ίδιο. Παρόλο που το μοναδιαίο κόστος είναι επίσης συγκρίσιμο με αυτό που υπολογίζεται για τη συλλογή των ομβρίων υδάτων, αυτές οι δύο τεχνολογίες έχουν πολύ μεγαλύτερη μείωση του όγκου απορροής. Η επιλογή βιοκατακράτησης για την επεξεργασία απορροής από τις πλακόστρωτες επιφάνειες είχε ένα προβλέψιμο υψηλότερο μοναδιαίο κόστος, λόγω της απόδοσής της που ήταν μεταξύ των άλλων τεχνικών ορθής διαδρομής και πιο περίπλοκου και δαπανηρού σχεδιασμού.

Από τη διερεύνηση της εφαρμογής των μεμονωμένων τεχνικών LID, το υψηλότερο μοναδιαίο κόστος καθορίστηκε για το διαπερατό οδόστρωμα και την πράσινη οροφή. Με το κεφαλαιουχικό κόστος κατασκευής του διαπερατού οδοστρώματος πάνω από το μεγάλο τμήμα της προτεινόμενης ανάπτυξης που υπερβαίνει κατά πολύ το κόστος οποιασδήποτε άλλης τεχνικής LID, η σχετικά καλή απόδοσή τους στον έλεγχο απορροής δεν επαρκούσε για να παράγει ένα μοναδιαίο κόστος συγκρίσιμο με άλλες τεχνικές διείσδυσης. Από την άλλη πλευρά, το υψηλό κόστος κεφαλαίου των πράσινων στεγών και τα μικρά κέρδη στον έλεγχο απορροής τους την καθιστούσαν την πιο ακριβή επιλογή όσον αφορά το μοναδιαίο κόστος. Σημειώνεται ότι ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνικών με άλλα LID που διηθούν την απορροή από τις πλακόστρωτες επιφάνειες οδήγησε σε σημαντική μείωση του μοναδιαίου κόστους. Για παράδειγμα, το μοναδιαίο κόστος διαπερατού οδοστρώματος σε συνδυασμό με τάφρους διείσδυσης, το οποίο έδειξε τη μεγαλύτερη συνολική μείωση του όγκου απορροής, είναι περίπου το ένα τρίτο του υπολογιζόμενου στην περίπτωση χρήσης περατού οδοστρώματος ως ενιαία LID.

Για την καλύτερη κατανόηση της οικονομικής απόδοσης των διαφορετικών επιλογών για τη μελετώμενη περιοχή σε σχέση με την απόδοση ελέγχου της απορροής, το κόστος κεφαλαίου κάθε συνδυασμού LID και κάθε LID ατομικά μπορεί να γραφτεί σε σχέση με την απόδοση μείωσης της απορροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Ο αριθμός σαφώς δείχνει ότι η υψηλότερη απόδοση με το χαμηλότερο κόστος είναι η πράσινη οροφή και τα κανάλια φυτοκάλυψης, αν και η μείωση απορροής που επιτυγχάνεται με κάθε μία από αυτές τις τεχνικές είναι αρκετά περιορισμένη. Εάν ο επιθυμητός έλεγχος απορροής είναι στην περιοχή 30%, άλλες επιλογές LID, όπως οι επιλογές που αφορούν περατό οδόστρωμα με ή χωρίς συγκομιδή ομβρίων υδάτων και πράσινες στέγες, μπορούν εύκολα να απορριφθούν. Ομοίως, εάν υπάρχει όριο στην επένδυση κεφαλαίου σε LIDs, μπορούν να επιτευχθούν εύκολα συμπεράσματα σχετικά με την υπεροχή της αποδοτικότητας κόστους των διαφόρων LID και των συνδυασμών τους.

Επομένως, το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 2.10 παρέχει μια χρήσιμη περίληψη της αποδοτικότητας ως προς το κόστος των διαφόρων επιλογών LID για μια συγκεκριμένη τοποθεσία που μπορεί να καθοδηγήσει αποτελεσματικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.



Σχήμα 2.10: Κόστος κεφαλαίου έναντι ποσοστού μείωσης της απορροής από συνδυασμούς LID  
Πηγή: Joksimovic et al. (2014)

### Συμπεράσματα

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν σε αυτή τη μελέτη είναι πολύ συγκεκριμένα και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του τόπου, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής των διαφόρων χρήσεων γης και των υδρολογικών ιδιοτήτων. Παρ' όλα αυτά, συνιστάται η μεθοδολογία που συνεπάγεται μια συνολική αξιολόγηση των διαφόρων συνδυασμών LID, συμπεριλαμβανομένου του κόστους και της μέσης μακροπρόθεσμης απόδοσής τους, ως τρόπος εξασφάλισης ότι επιλέγονται τελικά οι πλέον οικονομικά αποδοτικές επιλογές για λεπτομερή σχεδιασμό και υλοποίηση. Οι περιορισμοί αυτής της μελέτης που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν στο μέλλον περιλαμβάνουν: την εξέταση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης κατά την αξιολόγηση, αν και οι δύο θα μπορούσαν να βαρύνουν διαφορετικές οντότητες, λαμβάνοντας υπόψη άλλα τεκμηριωμένα οφέλη των LIDs όπως ο έλεγχος της ρύπανσης και οι οικολογικές λειτουργίες διεξάγοντας τις αναλύσεις απόδοσης χρησιμοποιώντας



τις προβλεπόμενες βροχοπτώσεις και θερμοκρασίες κάτω από σενάρια κλιματικής αλλαγής αντί για ιστορικές πληροφορίες (Joksimovic et al. 2014).

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν εκπονηθεί επικεντρώνονται στις υδρολογικές επιπτώσεις και δεν λαμβάνουν υπόψη την σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των πρακτικών LID. Ορισμένες άλλες μελέτες εξετάζουν τόσο τις υδρολογικές επιδράσεις όσο και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των διαφόρων συνδυασμών, τοποθεσιών και διαστάσεων των πρακτικών LID. Για παράδειγμα, οι Lee et al. (2012) αξιολογεί την αποδοτικότητα ως προς το κόστος και τις επιπτώσεις σε ετήσια ροή και ρύπανση από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών LID, ενώ ο Liao et al. (2013) αναλύει τις υδρολογικές επιπτώσεις και το κόστος κύκλου ζωής της βιοκατακράτησης, της τάφρου διήθησης, του πορώδους οδοστρώματος, των βαρελιών βροχής και των ανοικτών αυλάκων με φυτοκάλυψη σε διάφορες καταιγίδες σχεδιασμού στη Σαγκάη.

Ο στόχος λοιπόν της μελέτης των Chui et al. (2016) ήταν όχι μόνο ο προσδιορισμός του βέλτιστου σχεδιασμού με την αξιολόγηση των υδρολογικών επιδόσεων και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των διαφόρων σχεδίων πρακτικών LID σε οικιακή ή επιχειρηματική κλίμακα, αλλά και η ανάλυση της ευαισθησίας των υδρολογικών επιδόσεων και του κόστους του βέλτιστου σχεδιασμού σε διαφορετικές παραμέτρους μοντέλου και σχεδιασμού.

#### Περιοχή μελέτης

Δύο πόλεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης, Χονγκ Κονγκ, Κίνα και Σιάτλ, ΗΠΑ, επιλέχθηκαν για συγκρίσεις. Από τη μια το Χονγκ Κονγκ με υποτροπικό κλίμα και μέση ετήσια βροχόπτωση περίπου 2400 mm και που το 80% των ετήσιων βροχοπτώσεων εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου (από τον Μάιο έως τον Σεπτέμβριο). Το Σιάτλ από την άλλη ανήκει σε εύκρατο θαλάσσιο κλίμα, με μέση ετήσια βροχόπτωση περίπου 950 mm και λαμβάνει περίπου το 50% της ετήσιας πτώσης από τον Νοέμβριο ως τον Ιανουάριο του επόμενου έτους.

Δύο καταιγίδες σχεδιασμού, 2 έτη και 50 έτη, προσομοιώνονται για κάθε πόλη και για κάθε πρακτική LID. Οι καταιγίδες σχεδιασμού επιτυγχάνονται εφαρμόζοντας την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ στις καμπύλες συχνότητας βροχόπτωσης συχνότητας-όμβριες (IDF) του Χονγκ Κονγκ και του Σιάτλ. Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη χρήση του SWMM.

#### Κόστος

Αυτό το μέρος της μελέτης αξιολογεί το κόστος κεφαλαίου, λειτουργίας και συντήρησης (O&M) των πρακτικών LID για ένα υποτιθέμενο χρόνο ζωής των 30 ετών βάσει λεπτομερούς αξιολόγησης των τοπικών δαπανών εισροών, λειτουργιών και απαιτήσεων συντήρησης. Όλες οι

κατασκευές LID θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα στο έτος 0, ενώ το O&M συμβαίνει από το έτος 1 έως το έτος 30. Εκτελείται μια δοκιμή παρούσας αξίας (PV) με την κατάρτιση ολόκληρου του κόστους κύκλου ζωής (LCC).

Για τον υπολογισμό του κόστους κατασκευής και O&M για κάθε πρακτική LID, όλες οι αρχικές δαπάνες κατασκευής και κόστους O&M μετατρέπονται σε σταθερό δολάριο 2015 χρησιμοποιώντας δείκτη προσφοράς τιμών δομικών έργων (BWTP) για τους δείκτες τιμών Χονγκ Κονγκ και δείκτη τιμών καταναλωτή (CPI) για τα στοιχεία των ΗΠΑ.

Σε όλες τις περιπτώσεις, το κόστος O&M εκτιμάται ως παρούσα αξία του δολαρίου 2015, υποθέτοντας έναν κύκλο ζωής 30 ετών και ότι ο πληθωρισμός αντισταθμίζεται από το επιτόκιο. Οι δαπάνες γης, κατασκευών και O&M για κάθε πρακτική LID στο Χονγκ Κονγκ και το Σιάτλ παρατίθενται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Στοιχεία κόστους για διαφορετικές πρακτικές LID στο Χονγκ Κονγκ και το Σιάτλ  
Πηγή: Chui et al. (2016)

LID practices	Cost		Hong Kong	Seattle
Green roof	Land cost (US\$/m <sup>2</sup> )		1612	-
	Construction cost	Roof barrier (US\$/m <sup>2</sup> )	31	25
		Protection layer (US\$/m <sup>2</sup> )	2	-
		Drainage layer (US\$/m <sup>2</sup> )	29	34
		Filter fabric (US\$/m <sup>2</sup> )	2	-
		Waterproof layer (US\$/m <sup>2</sup> )	-	130
		Plant (US\$/m <sup>2</sup> )	17	55
		Gravel (US\$/m <sup>3</sup> )	165	44
		Soil (US\$/m <sup>3</sup> )	146	239
		Mulch (US\$/m <sup>3</sup> )	103	-
	O&M cost (US\$/m <sup>2</sup> )		16	60
Bioretention	Land cost (US\$/m <sup>2</sup> )		-	-
	Construction cost	Plant (US\$/m <sup>2</sup> )	7	59
		Gravel (US\$/m <sup>3</sup> )	90	86
		Soil (US\$/m <sup>3</sup> )	92	62
		Excavation (US\$/m <sup>3</sup> )	5	27
		Disposal (US\$/m <sup>3</sup> )	17	7
		Pipe (US\$/m)	19	39
		Gullies manhole (US\$/item)	1226	-
		Geotextile (US\$/m <sup>2</sup> )	-	3
	O&M cost (US\$/m <sup>2</sup> )		3.55 × Capital cost	239
Porous pavement	Land cost (US\$/m <sup>2</sup> )		-	-
	Construction cost	Filter fabric (US\$/m <sup>2</sup> )	2	6
		Gravel (US\$/m <sup>3</sup> )	90	58
		Excavation (US\$/m <sup>3</sup> )	5	28
		Disposal (US\$/m <sup>3</sup> )	17	7
		Pipe (US\$/m)	19	37
		Asphalt pavement (US\$/m <sup>3</sup> )	195	195
	O&M cost (US\$/m <sup>2</sup> )		1.78 × Capital cost	13

Οι διαστάσεις και το μοναδιαίο κόστος των βέλτιστων σχεδίων των διαφορετικών πρακτικών LID φαίνονται στον Πίνακα 2.6 και η μείωση της μέγιστης απορροής και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των βέλτιστων σχεδίων συνοψίζονται στον Πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.6: Διαστάσεις και κόστος μονάδας για βέλτιστα σχέδια των LID. Τα έξοδα Ο&Μ εκτιμώνται ως παρούσα αξία (2015 δολάρια), υποθέτοντας έναν κύκλο ζωής εγκατάστασης 30 ετών και ο πληθωρισμός αντισταθμίζεται από το επιτόκιο

Πηγή: Chui et al. (2016)

City	Design storm	LID practices	Length (m)	Width (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Coverage percentage (%)	Berm height <sup>b</sup> (mm)	Soil depth/pavement thickness (mm)	Drainage mat/storage thickness <sup>b</sup> (mm)	Unit cost (US\$/m <sup>2</sup> )				
										Land cost	Construction cost	O&M cost	Total cost excluding land cost	Total cost
Hong Kong	2 yr	Green roof	28	20	560	28	25	490	75	1612	152	16	168	1780
		Bioretention <sup>a</sup>	31.7	3	190	10	150	600	500	–	153	544	697	697
		Porous pavement	26	5	130	7	0	100	300	–	61	109	170	170
	50 yr	Green roof	28	20	560	28	25	500	75	1612	154	16	170	1782
		Bioretention <sup>a</sup>	43.8	4	350	18	150	600	500	–	146	518	664	664
		Porous pavement	41	5	205	10	0	100	300	–	58	103	161	161
Seattle	2 yr	Green roof	27	20	540	27	25	150	75	–	259	60	319	319
		Bioretention	10.7	3	32	2	150	700	500	–	224	239	462	462
		Porous pavement	13	2.5	32.5	2	0	100	300	–	72	13	85	85
	50 yr	Green roof	25	20	500	25	25	270	75	–	287	60	347	347
		Bioretention	19.3	3	58	3	150	700	500	–	224	239	462	462
		Porous pavement	23	2.5	57.5	3	0	100	300	–	72	13	85	85

Πίνακας 2.7: Μείωση της μέγιστης απορροής και οικονομική αποδοτικότητα των βέλτιστων σχεδίων

Πηγή: Chui et al. (2016)

City	Design storm	LID practices	Peak runoff (L/s)	Percentage of peak runoff reduction/thousand Dollars (%/10 <sup>3</sup> US\$)	Volume of peak runoff reduction/thousand Dollars (L/10 <sup>3</sup> US\$ s)
Hong Kong	2 yr	Green roof	81.77	0.02	0.02
		Bioretention	80.02	0.15	0.15
		Porous pavement	81.56	0.91	0.93
	50 yr	Green roof	149.92	0.02	0.04
		Bioretention	149.62	0.09	0.16
		Porous pavement	149.94	0.61	1.15
Seattle	2 yr	Green roof	17.18	0.12	0.03
		Bioretention	17.03	1.34	0.29
		Porous pavement	17.03	7.33	1.58
	50 yr	Green roof	41.89	0.12	0.06
		Bioretention	42.04	0.78	0.41
		Porous pavement	41.24	4.36	2.28

### Συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή αναλύει τις υδρολογικές επιδόσεις και την αποτελεσματικότητα των διαφόρων σχεδίων των τριών ειδικών πρακτικών LID, δηλαδή της πράσινης οροφής, της βιοκατακράτησης και του πορώδους οδοστρώματος, σε οικιακή ή επαγγελματική κλίμακα. Εξετάζει επίσης την ευαισθησία των βέλτιστων σχεδιασμών στις διαφορετικές παραμέτρους μοντέλου και σχεδιασμού. Τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

#### (1) Πράσινη οροφή

Η σχέση μεταξύ της μέγιστης μείωσης της ροής και του κόστους είναι σχεδόν γραμμική. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του τείνει να είναι μεγαλύτερος στην περιοχή μελέτης και πιο λεπτός όταν συγκρίνεται με την βιοκατακράτηση και το πορώδες οδόστρωμα. Ωστόσο, είναι πιο αποδοτικό από πλευράς κόστους για την αύξηση του βάθους του εδάφους από την επέκταση της περιοχής, ώστε να χειριστεί μεγαλύτερες θύελλες σχεδιασμού. Η πράσινη οροφή είναι η ελάχιστη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας για τη μείωση της ροής αιχμής μεταξύ των τριών πρακτικών LID (δηλαδή μεγάλο κόστος-μικρή μείωση αιχμής). Έτσι, η πράσινη οροφή συνιστάται μόνο εάν τα άλλα οφέλη της, όπως η εξοικονόμηση ενέργειας του κτιρίου, η βελτίωση της αισθητικής, είναι σημαντικά.

#### (2) Βιοκατακράτηση

Η σχέση μεταξύ της μείωσης της μέγιστης ροής και του κόστους για την βιοκατακράτησης σχηματίζει ένα σχήμα «S», όπου η μείωση της μέγιστης ροής αυξάνεται σημαντικά μόνο στο μεσαίο κόστος. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του τείνει να είναι μικρότερος σε περιοχή και πιο παχύς από αυτόν της πράσινης οροφής. Βέβαια, είναι πιο αποδοτικό να επεκταθεί η περιοχή επίδρασης από το να αυξηθεί το βάθος του εδάφους για να χειριστεί μεγαλύτερες θύελλες σχεδίασης. Η βιοκατακράτηση είναι πιο αποδοτική για τη μείωση της ροής από την πράσινη οροφή. Εντούτοις, οι δραστηριότητες O&M της βιοκατακράτησης είναι περισσότερο περιπλεγμένες και δαπανηρές.

#### (3) Πορώδες οδόστρωμα

Παρόμοια με την βιοκατακράτηση, η σχέση μεταξύ της μείωσης της ροής αιχμής και του κόστους για το πορώδες οδόστρωμα σχηματίζει ένα σχήμα «S». Ο βέλτιστος σχεδιασμός του τείνει να έχει μικρότερη περιοχή εφαρμογής και λεπτότερη επιφάνεια οδοστρώματος. Ωστόσο, είναι πιο οικονομικά αποδοτικό να επεκταθεί η περιοχή εφαρμογής από το να αυξηθεί το βάθος για να χειριστεί μεγαλύτερες καταιγίδες. Το πορώδες οδόστρωμα είναι το πιο οικονομικό για τη μείωση της ροής αιχμής μεταξύ των τριών πρακτικών LID. Ως εκ τούτου, συνιστάται σε

τοποθεσίες στις οποίες η διαχείριση των ομβρίων υδάτων είναι ο κύριος στόχος, διότι δεν έχει τα πιθανά οφέλη από τη βλάστηση και τα στρώματα εδάφους, που υπάρχουν σε άλλες πρακτικές LID.

(4) Σύγκριση μεταξύ Χονγκ Κονγκ και Σιάτλ Η σχέση κόστους/αποτελεσματικότητας των πρακτικών LID στο Χονγκ Κονγκ είναι χαμηλότερη από εκείνη στο Σιάτλ. Για την πράσινη στέγη, ο κύριος λόγος είναι το υψηλό κόστος γης στο Χονγκ Κονγκ, το οποίο αντιπροσωπεύει σχεδόν το 90% του συνολικού κόστους. Για την βιοκατακράτηση και το πορώδες οδόστρωμα, ο κύριος λόγος είναι το υψηλό κόστος Ο&Μ λόγω της πολύ περιορισμένης εμπειρίας και δεδομένων στο Χονγκ Κονγκ (Chui et al. 2016).

Όπως επανειλημμένως έχει τονιστεί οι πράσινες-μπλε υποδομές (GBI) στους αστικούς χώρους προσφέρουν πολλά επιπρόσθετα οφέλη (co-benefits) εκτός από τη μείωση του κινδύνου πλημμύρας, όπως η εξοικονόμηση νερού, η εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της λιγότερης χρήσης της ψύξης, της βελτίωσης της ποιότητας του αέρα και της δέσμευσης του άνθρακα. Παραδοσιακά, αυτά τα παράγωγα οφέλη δεν συμπεριλαμβάνονταν στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Οι Alves et al. (2019) λοιπόν, παρουσίασαν μια μέθοδο με την εργασία τους, ώστε να συμπεριληφθεί η νομισματική ανάλυση αυτών των co benefits σε μια ανάλυση κόστους-οφέλους των μέτρων μετριασμού του κινδύνου πλημμύρας. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόστηκε σε μια μελέτη περίπτωσης, συγκρίνοντας το κόστος και τα οφέλη με και χωρίς τα co benefits.

Η πράσινη και η μπλε υποδομή (GBI) λοιπόν, προσφέρουν μια πολυλειτουργική προσέγγιση που μπορεί να μειώσει την ευπάθεια και να αυξήσει την ανθεκτικότητα μπροστά στις πολλαπλές απειλές, όπως η αύξηση του κινδύνου πλημμύρας, της θερμικής έντασης, της έλλειψης νερού και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Παραδοσιακά, η διαχείριση των πλημμυρών επικεντρώθηκε σε γκρίζες ή παραδοσιακές λύσεις, όπως οι σωλήνες. Σήμερα, είναι κατανοητό ότι αυτή η προσέγγιση προσφέρει χαμηλή αιεφορία, ενώ η GBI παρέχει πολυάριθμα επιπρόσθετα οφέλη.

Η οικονομική αποτίμηση, συμπεριλαμβανομένων όλων των σχετικών δαπανών και οφελών, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη στήριξη της λήψης αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό της GBI, ιδιαίτερα κατά τη σύγκριση των διαφορετικών τύπων επενδυτικών επιλογών υποδομής. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των έργων είναι η ανάλυση κόστους-οφέλους (CBA), καθιστώντας ελκυστικό το σχέδιο εάν τα οφέλη είναι

υψηλότερα από το κόστος. Στην περίπτωση της διαχείρισης των πλημμυρών, η σύγκριση είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των μέτρων για την αύξηση της ασφάλειας και της μείωσης των αναμενόμενων ζημιών. Αυτή η μέθοδος προσφέρει σημαντική ορθολογική πληροφόρηση για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων κατά την επιλογή μεταξύ διαφορετικών λύσεων.

Παρά τις προκλήσεις που συνδέονται με την αποκόμιση χρηματικών οφελών, αναγνωρίζεται ότι η νομισματική αποτίμηση συμβάλλει στην ευαισθητοποίηση των υπευθύνων χάραξης πολιτικής σχετικά με την οικονομική σημασία αυτών των συναφών πλεονεκτημάτων.

Πολύ λίγες εργασίες χρησιμοποιούν την εκτίμηση της καθαρής παρούσας αξίας για τη διάρκεια ζωής των μέτρων, ώστε να συγκρίνουν τις βιώσιμες και παραδοσιακές στρατηγικές διαχείρισης των πλημμυρών από μια ολιστική προοπτική, η οποία περιλαμβάνει τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρει η GBI.

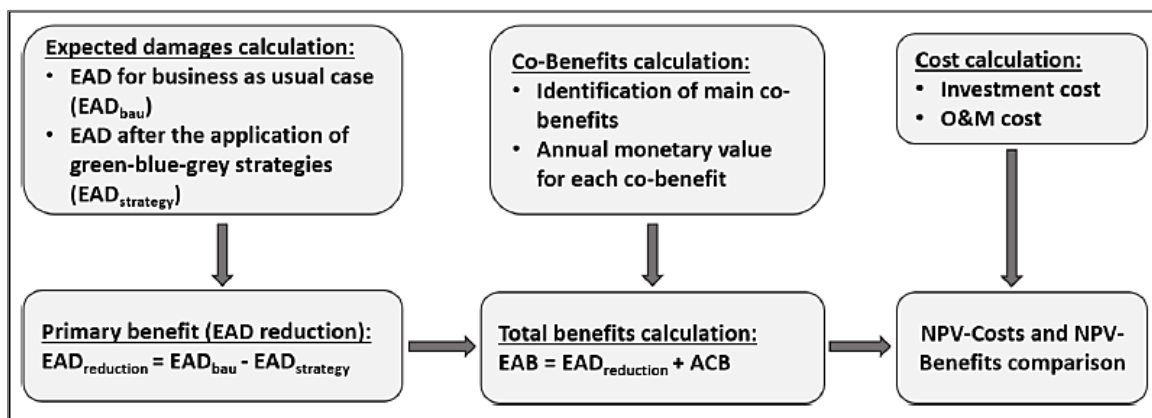
### Μεθοδολογία

Σε μια παραδοσιακή αξιολόγηση των μέτρων διαχείρισης των πλημμυρών, εξετάζεται μόνο το βασικό όφελος από τη μείωση των ζημιών από πλημμύρες. Στην περίπτωση αυτή, η εκτίμηση περιλαμβάνει πολλά δευτερεύοντα οφέλη, εκτός από τη μείωση των ζημιών από πλημμύρες. Για παράδειγμα, η μείωση του θερμικού στρες, η βελτίωση της ποιότητας του αέρα και η εξοικονόμηση νερού. Αυτά τα οφέλη είναι κοινά με την εφαρμογή πράσινων και μπλε μέτρων. Το Σχήμα 2.11 συνοψίζει ολόκληρη τη μεθοδολογική διαδικασία.

Το κύριο όφελος, που θεωρείται εδώ ως το όφελος που προκύπτει από τη μείωση των ζημιών από πλημμύρες, εκτιμάται από την αναμενόμενη ετήσια ζημία (EAD). Το EAD είναι το πιθανότερο πιθανό κόστος ζημιών από πλημμύρες ανά έτος για όλα τα πιθανά γεγονότα πλημμύρας και εκφράζεται σε νομισματικούς όρους. Στη συνέχεια, η μείωση της ζημίας από τις πλημμύρες υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ EAD στην περίπτωση των συνήθων επιχειρήσεων (χωρίς μέτρα) και της EAD μετά την εφαρμογή των μέτρων μείωσης των πλημμυρών.

Η ανάλυση κόστους/οφέλους απαιτεί την ποσοτικοποίηση όλων των δαπανών και οφελών σε νομισματικούς όρους. Αυτό επιτυγχάνεται εδώ με τον υπολογισμό της χρηματικής αξίας ανά έτος κάθε σχετικού παράγωγου οφέλους που προκύπτει από την εφαρμογή GBI (εκτός από το πρωταρχικό όφελος). Η προσθήκη της μείωσης των EAD και των ετήσιων παράγωγων οφελών (ACB), τόσο λόγω της εφαρμογής ενός συγκεκριμένου μέτρου ή ενός συνδυασμού μέτρων, είναι η αξία των συνολικών αναμενόμενων ετήσιων οφελών (EAB).

Εν τω μεταξύ, ο υπολογισμός του κόστους λαμβάνει υπόψη τις δαπάνες επένδυσης και συντήρησης κάθε εφαρμοζόμενου μέτρου. Μόλις εκτιμηθούν τα συνολικά οφέλη και το κόστος, και τα δύο μετατρέπονται στην καθαρή παρούσα αξία (NPV). Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση αυτών των αριθμών, θεωρούμενων ως παρούσες τιμές κόστους και ωφελειών, και τη σταθεροποίηση που είναι υψηλότερη σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του έργου.



Σχήμα 2.11: Μεθοδολογία για τη σύγκριση συνολικών οφελών και κόστους

Πηγή: Alves et al. (2019)

#### Υπολογισμός κόστους

Ο υπολογισμός των εξόδων βασίζεται στις τοπικές τιμές και στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Σε αυτό το έργο θεωρήθηκε το κόστος επένδυσης και συντήρησης μέσα από την διάρκεια ζωής κάθε υποδομής. Όλα τα ποσά μετατρέπονται στις εκτιμήσεις του ίδιου έτους χρησιμοποιώντας τον δείκτη τιμών καταναλωτή (CPI). όλες οι τιμές μετατρέπονται σε παρούσες τιμές χρησιμοποιώντας NPV για την περίοδο ζωής των μέτρων.

#### Περιοχή μελέτης

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε εδώ εφαρμόστηκε σε μια μελέτη στην ολλανδική πλευρά του νησιού Sint Maarten, που βρίσκεται στην περιοχή της Καραϊβικής. Αυτό το τμήμα του νησιού καλύπτει έκταση περίπου 33,80 km<sup>2</sup> με μέγιστο υψόμετρο τα 380 μέτρα. Οι υδρολογικές λεκάνες απορροής και τα ρέματα έχουν αρκετά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν σε σοβαρές επιπτώσεις από πλημμύρες. Για παράδειγμα, οι αστικές περιοχές βρίσκονται σε χαμηλές ζώνες, χωρίς καλή υποδομή αποστράγγισης. Εκτός αυτού, οι δρόμοι σε κατοικημένες περιοχές είναι συνήθως στενοί επιτρέποντας πολύ περιορισμένη περαιτέρω διεύρυνση των καναλιών καταιγίδας.



### Υπολογισμός επιπρόσθετων οφελών-Co benefits

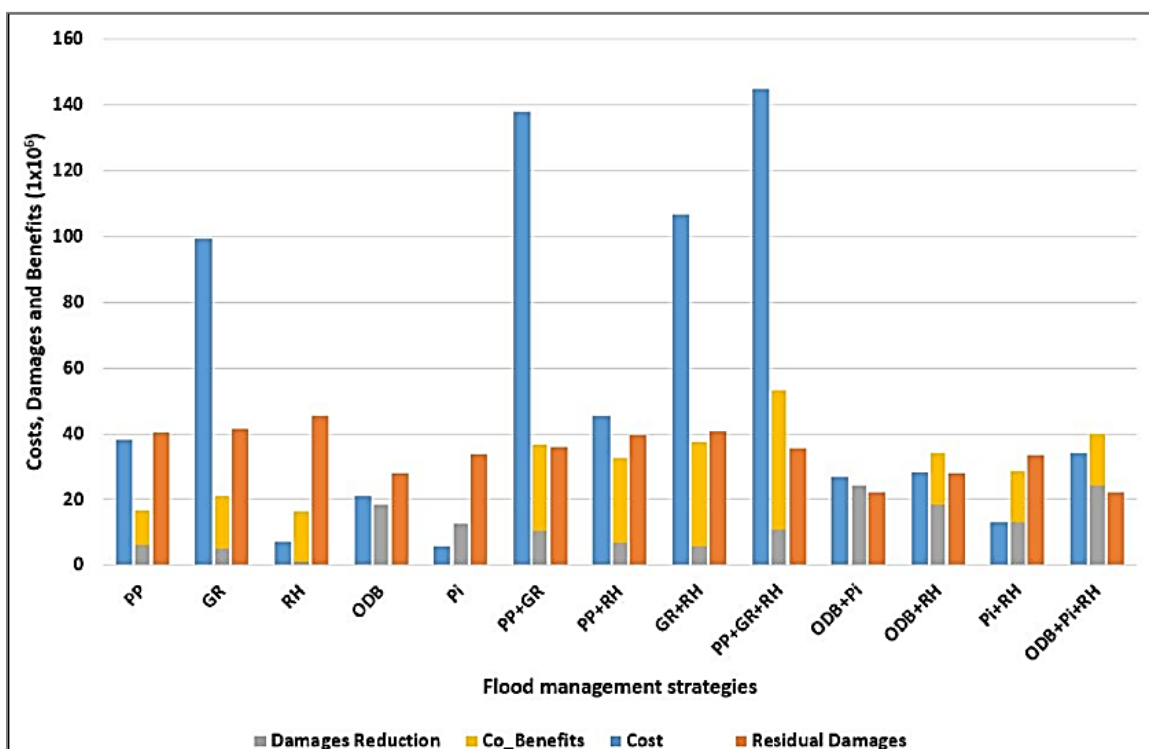
Στη συνέχεια, αναλύθηκαν τα βασικά παράγωγα οφέλη που προέκυψαν από τα επιλεγμένα μέτρα και η σημασία τους για την υπό μελέτη περίπτωση. Οι πράσινες στέγες προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα εκτός από τη μείωση της απορροής, όπως η θερμομόνωση των κτιρίων, η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η δέσμευση άνθρακα, καθώς και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις παραδοσιακές στέγες. Η μόνωση των κτιρίων είναι ζωτικής σημασίας σε αυτό το νησί, το οποίο έχει υψηλές θερμοκρασίες και συνεπώς υψηλή κατανάλωση ενέργειας για ψύξη. Επιπλέον, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι πολύ σημαντική, καθώς το νησί έχει δαπανηρή παραγωγή ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα τα οποία συνεπάγονται υψηλό αποτύπωμα άνθρακα και εκπομπές ρύπων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Επιπλέον, το νησί έχει μία από τις υψηλότερες περιφερειακές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και την κατανάλωση ενέργειας. Το σύνολο των άμεσων και των παράγωγων οφελών που συνδέονται με τις πράσινες στέγες αποδίδει αξία 2,91 €/m<sup>2</sup>/y και καθαρή παρούσα αξία NPV άνω των 30 ετών 447823 € ανά εκτάριο πράσινης οροφής που έχει εγκατασταθεί.

Η εγκατάσταση των βαρελιών συλλογής ομβρίων υδάτων σε επίπεδο νοικοκυριού είναι ένα χρήσιμο μέτρο που επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης πόσιμου νερού. Πρόκειται για ένα σημαντικό όφελος σε μια περιοχή όπου η παραγωγή και το κόστος των υδάτων αυξάνονται δραματικά τα τελευταία 10 χρόνια. Η παραγωγή νερού στο νησί βασίζεται στην αντίστροφη όσμωση, μια δαπανηρή τεχνολογία που συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Το συνολικό όφελος που οφείλεται στην εγκατάσταση βαρελιών βρόχινου νερού είναι 2,82 €/m<sup>2</sup> κάθε οροφής που συνδέεται με ένα βαρέλι και με NPV άνω των 30 ετών 433621 € ανά εκτάριο στέγης συνδεδεμένο με βαρέλια.

Όσον αφορά την εγκατάσταση διαπερατών οδοστρωμάτων, το μέτρο αυτό επιτρέπει την αστική “ψύξη” μέσα από τη μικρότερη αντανάκλαση και την υψηλότερη εξάτμιση. Αυτή η μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας μπορεί να φτάσει μεταξύ 8 και 3 βαθμούς Κελσίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας αντίστοιχα. Τα οφέλη που προκύπτουν από αυτή τη μείωση είναι η εξοικονόμηση ενέργειας ψύξης, καθώς και η σχετική μείωση του διοξειδίου του άνθρακα και των ατμοσφαιρικών ρύπων (USEPA 2012). Η μείωση της θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική για μια περιοχή με τροπικούς καιρούς και υψηλές μέσες θερμοκρασίες, όπου η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να φτάσει το 2-4% ανά βαθμού Κελσίου υψηλότερης θερμοκρασίας. Το συνολικό όφελος που οφείλεται σε φαινομενική εγκατάσταση οδοστρώματος

είναι 2,87 € ανά τετραγωνικό μέτρο πεζοδρομίου ανά έτος, με NPV άνω των 30 ετών 440700 € ανά εκτάριο πεζοδρομίου.

Τα επιτευχθέντα αποτελέσματα απεικονίζουν με ποσοτικούς όρους πώς η βιωσιμότητα της πράσινης και της μπλε υποδομής για μετριασμό των πλημμυρών μπορεί να βελτιωθεί ουσιαστικά όταν ληφθούν υπόψη τα συνολικά οφέλη. Στην περίπτωση που αναλύεται εδώ, το κόστος υπερβαίνει τα οφέλη για όλες τις πράσινες στρατηγικές, εάν δεν συμπεριληφθούν τα co-benefits. Αυτό σημαίνει ότι η παραδοσιακή επιλογή γκρι εμφανίζεται ως η μόνη οικονομικά βιώσιμη στρατηγική, εάν δεν ληφθούν υπόψη τα συνολικά οφέλη. Επομένως, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί το συμπληρωματικό όφελος κατά τον εντοπισμό των βέλτιστων στρατηγικών προσαρμογής για τη βελτίωση της διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας στις αστικές περιοχές, διαφορετικά οι πράσινες υποδομές ενδέχεται να φαίνονται λιγότερο αποδοτικές από τις συμβατικές γκρίζες υποδομές.



Σχήμα 2.12: Συνολικό κόστος, συνολικά οφέλη (μείωση ζημιών + παράγωγα οφέλη) και υπολειμματικές ζημιές για κάθε στρατηγική  
Πηγή: Alves et al. (2019)

Συνεχίζοντας, η Κίνα εφαρμόζει πράσινες υποδομές (GI) σε εθνική κλίμακα στο πλαίσιο του προγράμματος Sponge City (SCP). Ωστόσο λίγη προσοχή έχει δοθεί στη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της εφαρμογής των GI. Στη μελέτη λοιπόν του Mei et al. (2018)

εφαρμόστηκε ένα πλαίσιο αξιολόγησης βασισμένο στο μοντέλο SWMM και ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (LCCA) για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ανάπτυξης των GI για τον μετριασμό των πλημμυρών, με στόχο τη στήριξη της ισχυρής λήψης αποφάσεων σχετικά με το Sponge City σε αστικές λεκάνες απορροής. Ένα σενάριο βάσης και 15 σενάρια GI κάτω από έξι σχεδιαστικά γεγονότα βροχόπτωσης με διαστήματα επανάληψης κυμαινόμενα από 2-100 χρόνια προσομοιάστηκαν και αξιολογήθηκαν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υδρολογική απόδοση του GI ήταν ανίκανη να εξαλείψει τις πλημμύρες. Η ανάλυση έδειξε ότι το σενάριο του bioretention cell σε συνδυασμό με το vegetated swale ήταν η πιο οικονομικά αποδοτική επιλογή GI σε όλες τις βροχοπτώσεις. Ωστόσο, όσον αφορά το μέγιστο δυναμικό των περιοχών υλοποίησης όλων των σεναρίων GI, η περατό οδόστρωμα συν τα BC+VS θεωρήθηκε ως το πιο λογικό για την περιοχή μελέτης.

Πιο αναλυτικά, όπως επισημαίνεται εκτός των επιπτώσεων της αστικοποίησης που ήδη έχουν αναφερθεί, η συνέχιση της αύξησης της χωρητικότητας των γκρίζων υποδομών θεωρείται μη βιώσιμη λόγω των πιέσεων που συνδέονται με τις συνεχιζόμενες κλιματικές αλλαγές και την αστικοποίηση. Προηγούμενες μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι η υιοθέτηση πρακτικών GI, όπως η πράσινη οροφή (GR), το περατό οδόστρωμα (PP), το bioretention cell (BC), τα βαρέλια συλλογής βροχής (RB) και τα ανοικτά αυλάκια με φυτοκάλυψη (VS) ελαχιστοποιούν την εκροή ρύπων, μειώνουν τη διάβρωση και διατηρούν τις ροές βάσης των ρεμάτων.

Ωστόσο, οι διάφορες πρακτικές GI έχουν διαφορετικές υδρολογικές επιπτώσεις και κόστος. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητες ολοκληρωμένες αξιολογήσεις που περιλαμβάνουν αξιολογήσεις κόστους-αποτελεσματικότητας των πιθανών επιλογών GI στην κατασκευή του Sponge City. Στη συνέχεια εξετάστηκαν οι επιδόσεις μετριασμού της πλημμύρας σε σχέση με το κόστος κύκλου ζωής (LCCs) για την αξιολόγηση της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των διαφόρων σεναρίων GI.

#### Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης περιελάμβανε τη λεκάνη απορροής Liangshuihe (LSH), η οποία βρίσκεται στα νότια του κέντρου του Πεκίνου, στην Κίνα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 522,4 mm, εκ των οποίων το 81,6% σημειώνεται κατά τη διάρκεια του Μαΐου-Σεπτεμβρίου. Το υψηλό ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών, σε συνδυασμό με ακραίες βροχοπτώσεις το καλοκαίρι, μπορεί να

οδηγήσει σε σοβαρές καταστροφές από πλημμύρες, οι οποίες έχουν προκαλέσει σοβαρές οικονομικές συνέπειες.

#### Ανάλυση κόστους-αποτελεσματικότητας

Ο έλεγχος του κόστους είναι ένας από τους κύριους προβληματισμούς κατά την προώθηση των GI, ειδικά στην κλίμακα των λεκανών απορροή. Σε αυτή τη μελέτη, εφαρμόστηκε η παρούσα αξία του οφέλους (PVB) και η παρούσα αξία κόστους (PVC) για την ανάλυση της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των GI, που αντιπροσωπεύεται εδώ με την τιμή κόστους/οφέλους (B/C) χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4). Η τιμή B/C μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση της οικονομικής αποδοτικότητας συγκεκριμένων πρακτικών GI ή συνδυασμών GI, καθώς υψηλότερες τιμές B/C αντανακλούν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της GI:

$$BC = \frac{PVB}{PVC}$$

όπου το PVB είναι δείκτης που αντικατοπτρίζει το όφελος μετριασμού της πλημμύρας ή την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του γεωγραφικού εντοπισμού.

Θεωρήθηκε ότι τα PPs, VSs και BCs ενσωματώθηκαν στην υπάρχουσα ή μη διαρθρωτική υποδομή και ότι οι GR δεν καταλάμβαναν καμία γη. Ως εκ τούτου, εδώ, η GI θεωρήθηκε ότι υπέστη μηδενικό κόστος γης.

#### Ανάλυση κόστους των GI και των συνδυασμών τους

Ο Πίνακας 2.8 παρουσιάζει το κόστος κάθε πρακτικής GI με αναφορά σε πρόσφατη σχετική έρευνα, μαζί με γενικές ενδιάμεσες τιμές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς LCC (life cycle cost) σε αυτή τη μελέτη. Οι μονάδες LCC των πρακτικών GR, PP, VS, and BC καθορίστηκαν σε \$317.10, \$98.79, \$31.72, and \$186.90, αντίστοιχα. Η πρακτική VS χαρακτηρίζεται από το χαμηλότερο LCC, το οποίο μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι αυτή η πρακτική απαιτεί απλό σχεδιασμό, σχεδιασμό και κατασκευή και ελάχιστη λειτουργία και συντήρηση.

Πίνακας 2.8: Εκτιμήσεις κόστους κύκλου ζωής των πρακτικών μεμονωμένων GI

Πηγή: Mei et al. (2018)

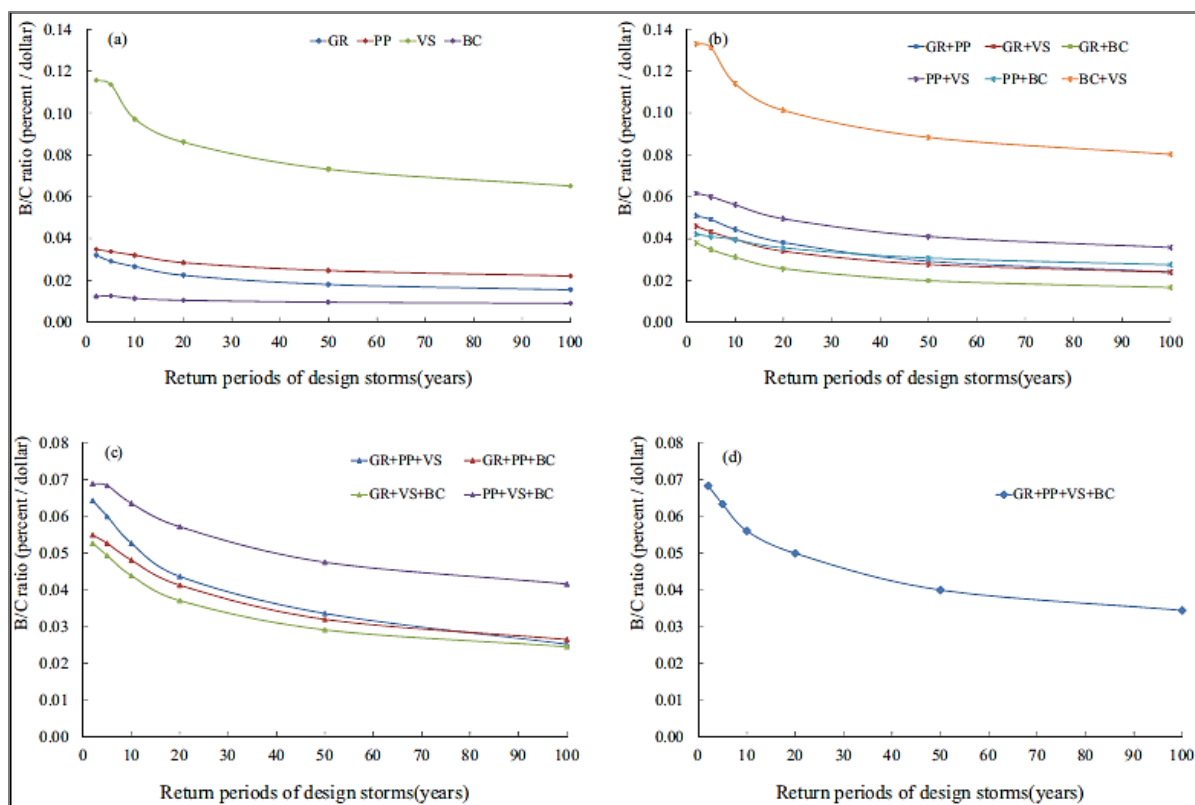
GI	Unit initial cost			Unit O&MC		Unit salvage value		Life cycle cost (LCC)	Unit annual average cost (UAAC)
	Construction	Design and planning	Total cost	Percentages	Annual O&MC	Projected lifetime	Salvage value		
	Dollars/m <sup>2</sup>	Dollars/m <sup>2</sup>	Dollars/m <sup>2</sup>	%	Dollars/m <sup>2</sup>	Years	Dollars/m <sup>2</sup>		
GR	69-165 <sup>a</sup>	-	69.00-165.00	6-16 <sup>d</sup>	4.14-26.4	20 <sup>d</sup>	14.51	317.10	15.86
PP	28-150 <sup>b</sup>	3.36 <sup>c</sup>	31.36-153.36	1 <sup>d</sup>	0.28-1.50	8 <sup>e</sup>	0.78	98.48	12.31
VS	26.25 <sup>c</sup>	0.36 <sup>c</sup>	26.61	1-2 <sup>e</sup>	0.26-0.52	20 <sup>d</sup>	0.37	31.72	1.59
BC	102.72 <sup>c</sup>	3.39 <sup>c</sup>	106.11	5-7 <sup>f</sup>	5.14-7.19	20 <sup>d</sup>	5.86	186.90	9.34

#### Αξιολογήσεις κόστους-αποτελεσματικότητας διαφορετικών σεναρίων GI

Το Σχήμα 2.13 παρουσιάζει τις τιμές B/C των διαφορετικών πρακτικών GI και συνδυασμών GI στα έξι συμβάντα βροχόπτωσης. Για τις πρακτικές ενός GI (Σχήμα 2.13 α), η τιμή B/C μειώνεται από 0,12 σε 0,01 με τη σειρά: VS>PP>GR>BC και μειώνεται με την αυξανόμενη περίοδο βροχόπτωσης. Από την άποψη της τιμής B/C, η σειρά των έξι συνδυασμών των δύο πρακτικών GI είναι BC + VS>PP + VS>(PP + BC, GR + PP)>GR + VS >GR + BC (Σχήμα 2.13 β), και η σειρά των PP + BC και GR + PP άλλαξε ανάλογα με την περίοδο επιστροφής βροχής. Για τους τέσσερις συνδυασμούς τριών πρακτικών GI (Σχήμα 2.13 γ), η σειρά από την άποψη της τιμής B/C είναι PP + VS + BC >(GR + PP + VS, GR + PP + BC)>GR + VS + BC, και οι τιμές B / C κυμαίνονται από 0,02 έως 0,08% / δολάριο. Η τιμή B / C της πρακτικής GR + PP + VS + BC έχει την ίδια τάση με τους άλλους συνδυασμούς, δηλ. μειώνεται με την αύξηση της περιόδου βροχόπτωσης από 0,07 σε 0,03% / δολάριο (Σχήμα 2.13 δ).

#### Ολοκληρωμένες αξιολογήσεις διαφόρων σεναρίων GI

Δεδομένου ότι η τιμή B/C αντικατοπτρίζει την αποτελεσματικότητα της μείωσης των πλημμυρών ανά μονάδα κόστους, ο συνδυασμός BC + VS είναι η πιο αποδοτική GI επιλογή ανά μονάδα επένδυσης στα έξι γεγονότα βροχόπτωσης αυτής της μελέτης, ακολουθούμενη από VS, PP+VS+BC και GR+PP+VS+BC. Ωστόσο, οι εφαρμοζόμενες περιοχές BC και VS καλύπτουν τα 3,26 (0,50%) και 37,15 (5,70%) km<sup>2</sup>, αντίστοιχα, της περιοχής μελέτης. Ως εκ τούτου, για τον αποτελεσματικό μετριασμό των αστικών πλημμυρών, συνδυασμοί τριών ή τεσσάρων διαφορετικών πρακτικών GI με βάση την πρακτική κατάσταση θα μπορούσαν ενδεχομένως να είναι οι βέλτιστοι για την ανάπτυξη της λεκάνης της λεκάνης απορροής. Μεταξύ των συνδυασμών τριών ή τεσσάρων πρακτικών GI, η πρακτική PP + VS + BC χαρακτηρίζεται από την χαμηλότερη τιμή UAAC και την υψηλότερη τιμή B/C, υποδηλώνοντας ότι η εφαρμογή αυτού του συνδυασμού θα μπορούσε να επιτύχει το υψηλότερο όφελος από την άποψη του μετριασμού των πλημμυρών για το ίδιο επενδυτικό κόστος. Συνεπώς, ο συνδυασμός PP+VS+BC συνιστάται ως η πιο λογική επιλογή GI για την λεκάνη απορροής LSH.



Σχήμα 2.13: Συγκρίσεις των τιμών B/C των διαφορετικών σεναρίων GI στα έξι γεγονότα βροχοπτώσης

Πηγή: Mei et al. (2018)

#### Συμπεράσματα της ανάλυσης κόστους-αποτελεσματικότητας

Για παράδειγμα, οι GRs είναι αποτελεσματικοί στην επίλυση πλημμυρών λόγω της ευρύτερης διαμόρφωσής τους και των τεχνικών χαρακτηριστικών τους. Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλα GI το κόστος τους είναι σχετικά υψηλό, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές B/C για τα σενάρια GI που περιλαμβάνουν GRs. Σαφώς, οι GR θα αποτελούσαν μια καλύτερη επιλογή εάν τα έξοδα συντήρησής τους ήταν χαμηλότερα. Περαιτέρω ανάλυση έδειξε ότι τα O&MCs (operation and maintenance costs) συμβάλλουν στη μεγαλύτερη αναλογία των LCCs για GRs. Κατά συνέπεια, η μείωση των O&MCs είναι σημαντική σε σχέση με την εφαρμογή των GR. Επιπλέον, οι τιμές B/C των συνδυασμών GI αποδείχτηκαν ότι είναι υψηλότερες από εκείνες των πρακτικών μεμονωμένων GI (εκτός των VSs), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι συνδυασμοί GI αποτελούν πιο λογικές επιλογές από τις εφαρμογές πρακτικών ενός GI (Mei et al. 2018).

Όπως αναφέρει ο Dileo (2018) ανακαλύφθηκε η αύξηση κατά 18% των αδιαπέρατων επιφανειών στην Ινδιανάπολη της Ινδιάνας κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος 18 ετών προκάλεσε αύξηση του ετήσιου μέσου όγκου απορροής κατά 80% και αύξηση του μέσου ετήσιου φορτίου

των μετάλλων κατά περισσότερο από 50%. Η αύξηση των πλακόστρωτων επιφανειών μειώνει την ικανότητα του καταιγίδας να διεισδύσει στο έδαφος και να επεξεργαστεί φυσικά το νερό της θύελλας, προτού επαναφορτίσει τα υπόγεια ύδατα. Ως αποτέλεσμα, μια υψηλότερη ποσότητα απορροής καταλήγει στα αποχετευτικά συστήματα, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα υπερφόρτωσης του συστήματος, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε πλημμύρες κατά τη διάρκεια σοβαρών γεγονότων καταιγίδας.

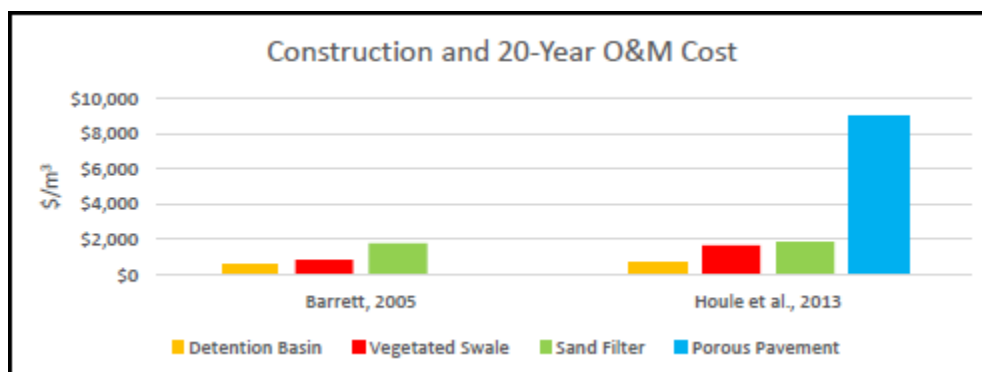
Η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των Ηνωμένων Πολιτειών (USEPA) (2003) σημειώνει ότι η απορροή των ομβρίων υδάτων αυξάνεται από 10% σε 55% για αναπτυξιακά έργα που μεταβάλλουν την φυσική κάλυψη εδάφους σε μια αδιαπέρατη περιοχή. Η ρηχή διείσδυση των ομβρίων υδάτων για επαναφόρτιση υπογείων υδάτων μειώνεται επίσης από 25% σε 10% ως αποτέλεσμα της αδιάκοπης κάλυψης μετά την ανάπτυξη (USEPA 2003). Εκτός από τις υδρολογικές επιπτώσεις της αστικοποίησης, η χρήση της αστικής γης επηρεάζει επίσης τις τιμές TSS σε παρακείμενα επιφανειακά ύδατα. Οι συγκεντρώσεις TSS σε φυσικά υποβαθμισμένα ρεύματα στη Νότια Καλιφόρνια βρέθηκαν να είναι δύο φορές πιο χαμηλές σε σύγκριση με τις ροές στις ανεπτυγμένες περιοχές. Οι υδρολογικές επιπτώσεις και η αύξηση του TSS στην απορροή των ομβρίων υδάτων τονίζει τη σημασία της τεχνολογίας LID για την άμβλυνση αυτών των ανησυχιών.

#### Χρηματοοικονομικά έξοδα των συστημάτων LID

Ο Dileo (2018) μετά την ανασκόπηση της τρέχουσας πρωτογενούς βιβλιογραφίας για πληροφορίες σχετικά με το κόστος των συστημάτων επεξεργασίας LID, αναφέρει πως είναι σαφές ότι η διαθεσιμότητα κεφαλαίου και το κόστος O&M είναι περιορισμένα. Οι Houle et al. (2013) είναι το μόνο κύριο άρθρο που περιελάμβανε σύγκριση κόστους και των τεσσάρων τύπων επεξεργασίας LID, το οποίο περιλαμβάνει λεκάνες κατακράτησης, φίλτρα άμμου, πορώδη οδοστρώματα και ανοικτά κανάλια με φυτοκάλυψη. Ο Barrett (2005) διεξήγαγε μια σύγκριση κόστους που περιελάμβανε λεκάνες κατακράτησης, φίλτρα άμμου και ανοικτά κανάλια με φυτοκάλυψη, αλλά δεν συνέκρινε πορώδη οδοστρώματα. Το κόστος από Barrett (2005) και Houle et al. (2013) δεν μπορεί να συγκριθεί άμεσα λόγω των ανεπαρκών διαθέσιμων πληροφοριών και από τις δύο μελέτες για την αξιολόγηση των διαφορών που παρατηρούνται στο κόστος, αλλά η τάση στη σύγκριση του συνολικού κόστους μπορεί να είναι πιο πολύτιμη.

Ο Barrett (2005) παρατήρησε ότι οι λεκάνες κατακράτησης ήταν οι λιγότερο δαπανηρές όταν εξετάζονταν οι δαπάνες κατασκευής και O&M και η μείωση του όγκου απορροής του

συστήματος. Τα ανοικτά κανάλια με φυτοκάλυψη ήταν το δεύτερο λιγότερο δαπανηρό, ενώ τα φίλτρα άμμου ήταν τα πιο δαπανηρά (Barrett 2005). Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε στους Houle et al. (2013) από τα λιγότερο δαπανηρά έως τα πιο ακριβά: λεκάνες κατακράτησης, ανοικτά κανάλια με φυτοκάλυψη, φίλτρα άμμου και πορώδη οδόστρωμα (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: Κατασκευαστικό και Ο&Μ κόστος για τα 4 LID  
Πηγή: Dileo (2018)

Ακόμα συμπληρώνει ότι οι Joksimovic και Alam (2014) (η μελέτη τους αναφέρθηκε παραπάνω) δεν αξιολόγησαν τα κόστη Ο&Μ, αλλά σημείωσαν ότι τα ανοικτά κανάλια με φυτοκάλυψη ήταν πολύ πιο αποδοτικά σε σχέση με τα πορώδη οδοστρώματα, όταν εξετάζονταν το κόστος κεφαλαίου και η ογκομετρική χωρητικότητα του συστήματος. Στον Πίνακα παρακάτω, οι Joksimovic και Alam (2014) έχουν το υψηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος για το πορώδες οδόστρωμα και τα ανοικτά κανάλια με φυτοκάλυψη, αλλά το χαμηλότερο κεφαλαιουχικό κόστος ανά χωρητικότητα ογκομετρικής απορροής, γεγονός που υποδηλώνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εγκατεστημένο σύστημα, τόσο πιο αποδοτικό λόγω της αυξημένης ικανότητας απορροής. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην καλύτερη αγοραστική αξία των υλικών κατά την αγορά μεγαλύτερης ποσότητας, καθώς και στην καλύτερη αξία από την κατασκευαστική εταιρεία για την κλιμάκωση μεγαλύτερων έργων, αλλά λόγω περιορισμένων διαθέσιμων πληροφοριών, αυτές οι υποθέσεις είναι αβέβαιες.



Πίνακας 2.19: Κόστος για μέτρα LID

Πηγή: Dileo (2018)

LID Treatment Type	Capital / Construction Cost	Construction Cost of the Design Storm (\$/m <sup>2</sup> )	Annual O&M Cost	Annual O&M Cost of the Design Storm (\$/m <sup>2</sup> )	Construction and O&M Cost (20-Year) (\$/m <sup>2</sup> )	Literature Source
Detention Basin	\$172,737	\$590	\$3,120	\$83	\$673	Barrett, 2005
Delaware Sand Filter	\$230,145	\$1,912	\$2,910	\$78	\$1,990	Barrett, 2005
Austin Sand Filter	\$242,799	\$1,447	\$2,910	\$78	\$1,525	Barrett, 2005
Vegetated Swale	\$57,818	\$752	\$2,750	\$74	\$826	Barrett, 2005
Detention Basin	\$40,700	\$417	\$6,150	\$15	\$712	Houle et al., 2013
Sand Filter	\$37,700	\$386	\$7,210	\$74	\$1,862	Houle et al., 2013
Porous Pavement	\$65,700	\$4,940	\$2,670	\$201	\$8,955	Houle et al., 2013
Vegetated Swale	\$63,200	\$647	\$4,940	\$51	\$1,658	Houle et al., 2013
Porous Pavement	\$4,308,214	\$157	-	-	-	Joksimovic and Alam, 2014
Vegetated Swale	\$2,024,786	\$29	-	-	-	Joksimovic and Alam, 2014

#### Συμπεράσματα και Συστάσεις

Οι υπάρχουσες μελέτες έχουν δείξει ότι τα μέτρα LID για το νερό των ομβρίων είναι αποτελεσματικά για τη μείωση της απορροής και τη βελτίωση της ποιότητας του νερού, αλλά οι μελέτες που μπορούν να βοηθήσουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στην επιλογή των πιο αποτελεσματικών πρακτικών για τις ανάγκες τους σε ποιότητα νερού είναι περιορισμένες.

Οι ξηρές δεξαμενές κράτησης αναμενόταν να ήταν οι λιγότερο δαπανηρές ανά όγκο απορροής. Με βάση την ανασκόπηση της διαθέσιμης πρωτογενούς βιβλιογραφίας, αυτές οι υποθέσεις ήταν σωστές. Όταν εξετάζουμε το κόστος κεφαλαίου και Ο&Μ, οι λεκάνες κατακράτησης σημειώθηκαν ως οι λιγότερο δαπανηρές στους Houle et al. (2013) και Barrett (2005), ενώ τα φίλτρα άμμου και τα συστήματα πορώδους οδοστρώματος ήταν τα πιο ακριβά ανά ογκομετρική χωρητικότητα απορροής του συστήματος. Το κόστος μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, την τοποθεσία και τις απαιτήσεις συντήρησης.

Εάν οι ιδιοκτήτες και οι φορείς αναζητούν ένα σύστημα επεξεργασίας λυμάτων με υψηλότερη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης TSS, αλλά επιδιώκουν το σύστημα που θα κοστίσει λιγότερο κεφάλαιο και κόστος συντήρησης για 20 έτη, συνιστάται η επιλογή των vegetated swales. Οι λεκάνες κατακράτησης είναι οι λιγότερο δαπανηρές, αλλά έχουν την λιγότερο αποτελεσματική απομάκρυνση TSS. Δεδομένου ότι τα vegetated swales, τα πορώδη οδοστρώματα και τα φίλτρα άμμου δεν είναι στατιστικά διαφορετικά στις δυνατότητες απομάκρυνσης TSS, τα πρώτα χαρακτηρίζονται ως η πλέον αποδοτική λύση για την επίτευξη των απαιτήσεων ποιότητας νερού και τη μείωση της απορροής των ομβρίων στα δημοτικά συστήματα μεταφοράς.



### 3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWMM

#### 3.1 Γενικά

Το Storm Water Management Model (SWMM), είναι ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης βροχής-απορροής. Αναπτύχθηκε από τον Οργανισμό Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α μεταξύ 1969 και 1971 και ήταν το πρώτο μοντέλο για την ανάλυση της αστικής απορροής. Η εφαρμογή του είναι κατάλληλη τόσο σε μεμονωμένα επεισόδια βροχής, όσο και σε συνεχή προσομοίωση της ποσότητας και ποιότητας της απορροής νερού κυρίως σε αστικές και περιαστικές περιοχές (Rossman 2016). Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διόδευσης της απορροής και των διαφόρων εισροών στα δίκτυα αποχέτευσης και ουσιαστικά δίνει τη δυνατότητα διαχείρισης των δικτύων αποχέτευσης ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Συνεχώς αναβαθμίζεται, εξελίσσεται και συμπληρώνεται με νέες λειτουργίες ώστε σήμερα να θεωρείται ένα από τα πιο πλήρη και εύχρηστα μοντέλα στην κατηγορία του.

Το SWMM λειτουργεί με διαίρεση της λεκάνης απορροής σε ένα σύνολο από υδραυλικά στοιχεία, δηλαδή από υπολεκάνες και αγωγούς. Καθένα από αυτά τα στοιχεία χαρακτηρίζεται από διάφορες υδραυλικές ιδιότητες όπως για παράδειγμα το μέγεθος, η κλίση, ο συντελεστής τραχύτητας κ.λπ. Το τμήμα της διόδευσης του SWMM μεταφέρει την απορροή μέσω ενός συστήματος αγωγών, αντλιών και συσκευών αποθήκευσης και επεξεργασίας.

Συνολικά το πρόγραμμα αυτό παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον της περιοχής μελέτης, για την εισαγωγή δεδομένων, την προσομοίωση των υδρολογικών και υδραυλικών διαδικασιών και της ποιότητας των απορροών και τέλος την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε διαφορετικές μορφές ( γραφήματα, πίνακες χρονοσειρών, στατιστική ανάλυση συχνοτήτων κ.α.)

#### 3.2 Ιστορική Εξέλιξη του SWMM

Το μοντέλο SWMM παρουσιάστηκε αρχικά το 1971 ως ένα υπολογιστικό εργαλείο για την ποσοτική και ποιοτική προσομοίωση της απορροής από καταιγίδες, κατά κύριο λόγο σε αστικές περιοχές. Μετά την 1<sup>η</sup> έκδοση, έγιναν τέσσερις κύριες αναβαθμίσεις: 2<sup>η</sup> έκδοση (1973-1975), 3<sup>η</sup> έκδοση (1979-1981), 4<sup>η</sup> έκδοση (1985-1988) και 5<sup>η</sup> έκδοση (2001-2004).

### 3.3 Δυνατότητες του μοντέλου

Το προσομοιώνει διάφορες υδρολογικές διεργασίες που περιλαμβάνουν την επιφανειακή απορροή σε αστικές περιοχές. Τέτοιες διεργασίες είναι οι εξής:

- Βροχόπτωση
- Εξάτμιση επιφανειακού νερού
- Συσσώρευση και τήξη χιονιού
- Επιφανειακή αποθήκευση
- Διήθηση σε ακόρεστα στρώματα εδάφους
- Διείσδυση διηθούμενου νερού σε στρώματα υπογείων υδάτων
- Επιφανειακή απορροή
- Ταχεία υπεδάφια απορροή
- Εφαρμογή αειφόρων μεθόδων διαχείρισης της όμβριας απορροή (LIDs)

Σε όλες αυτές τις διεργασίες είναι δυνατόν να επιτευχθεί χωρική μεταβλητότητα, χωρίζοντας την περιοχή μελέτης σε μικρότερες, ομογενείς λεκάνες κάθε μια από τις οποίες χωρίζεται αντίστοιχα σε διαπερατό και αδιαπέρατο μέρος. Η επιφανειακή απορροή μπορεί να διοδευθεί ανάμεσα στις υπολεκάνες, τις λεκάνες και τα σημεία εισόδου ενός αποχετευτικού συστήματος. Εκτός από τις υδρολογικές διαδικασίες, το SWMM εμπεριέχει ένα σύνολο υδραυλικών δυνατοτήτων μοντελοποίησης. Αυτές οι δυνατότητες είναι οι εξής:

1. Χειρισμός δικτύων απεριόριστου μεγέθους.
2. Χρήση μεγάλης ποικιλίας προκαθορισμένων σχημάτων κλειστών και ανοιχτών αγωγών.
3. Μοντελοποίηση ειδικών στοιχείων όπως μονάδες αποθήκευσης και επεξεργασίας, αντλίες, υπερχειλιστές και στόμια.
4. Δυνατότητα εφαρμογής εξωτερικών εισροών λόγω επιφανειακής απορροής, ταχείας υπεδάφιας απορροής, διήθησης λόγω βροχόπτωσης καθώς και άλλων εισροών οριζόμενων από τον χρήστη.
5. Διόδευση σε συνθήκες ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης ροής.
6. Μοντελοποίηση ακόμα και πολύπλοκων φαινομένων ροής όπως ανάστροφη ροή, υπερχειλίση κ.α.
7. Εφαρμογή δυναμικών κανόνων ελέγχου, οριζόμενων από τον χρήστη για την προσομοίωση της λειτουργίας των αντλιών, των διαφραγμάτων, των στομίων κ.α.

Το SWMM μπορεί επίσης να υπολογίσει τη δημιουργία των ρυπαντικών φορτίων που συνδέονται με συγκεκριμένη απορροή. Συγκεκριμένα, το SWMM έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει μια σειρά από ποιοτικές παραμέτρους των απορροών που καθορίζονται από το χρήστη του προγράμματος, όπως είναι π.χ. (Rossman 2010):

1. Οι ρύποι που δημιουργούνται κατά την άνομβρη περίοδο από διάφορες χρήσεις γης.
2. Οι ρύποι που μεταφέρονται με τις απορροές από συγκεκριμένες χρήσεις γης κατά τη διάρκεια των επεισοδίων βροχής.
3. Η άμεση συμβολή των βροχοπτώσεων στις εναποθέσεις φερτών υλικών.
4. Η μείωση του ρυπαντικού φορτίου κατά τις ξηρές περιόδους λόγω του καθαρισμού των οδών.
5. Η μείωση του φορτίου απόπλυσης δια μέσου των βέλτιστων συνθηκών διαχείρισης.
6. Οι παρασιτικές εισροές κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων στο δίκτυο ακαθάρτων και οι εισροές που καθορίζονται από το χρήστη σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου.
7. Η διόδευση των ποιοτικών συστατικών του νερού διαμέσου του συστήματος αποχέτευσης.
8. Η μείωση της συγκέντρωσης των διαφόρων συστατικών που περιέχονται στις απορροές ομβρίων μέσω της επεξεργασίας σε μονάδες αποθήκευσης ή με φυσικές διαδικασίες στους αγωγούς και στις τάφρους.

### 3.4 Τυπικές εφαρμογές του SWMM

Από την έναρξη του, το SWMM έχει χρησιμοποιηθεί σε χιλιάδες μελέτες δικτύων ακαθάρτων και ομβρίων σε όλο τον κόσμο οι πιο τυπικές από τις οποίες είναι (Rossman 2010):

- Σχεδίαση και διαστασιολόγηση τμημάτων αποχετευτικών συστημάτων για τον έλεγχο των πλημμυρών.
- Διαστασιολόγηση δεξαμενών αποθήκευσης και των συστατικών τους για τον έλεγχο των πλημμυρών και την προστασία της ποιότητας του νερού.
- Χαρτογράφηση της κοίτης πλημμυρών των φυσικών υδατορρεμάτων.
- Δημιουργία σεναρίων ελέγχου για την ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων των αγωγών των παντορροϊκών δικτύων με αξιολόγηση των επιπτώσεων των εισροών και των διηθήσεων από τις υπερχειλίσεις των αγωγών ακαθάρτων.
- Δημιουργία ρυπαντικών φορτίων από μη σημειακές πηγές ρύπανσης για τις μελέτες κατανομής των φορτίων των αποβλήτων.

- Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των BMPs (LIDs) για τη μείωση των ρυπαντικών φορτίων κατά τις υγρές περιόδους .

### 3.5 Εννοιολογική αντίληψη μοντέλου

Το SWMM αντιλαμβάνεται το αποχετευτικό σύστημα ως μια σειρά από ροές νερού και άλλων υλικών που λαμβάνουν χώρα σε τέσσερα κύρια τμήματα του περιβάλλοντος. Τα τμήματα αυτά είναι (Rossman 2010):

1. Το τμήμα της ατμόσφαιρας (Atmosphere compartment): στο τμήμα αυτό παράγεται η κατακρήμνιση και οι ρύποι, οι οποίοι εναποτίθενται στο τμήμα της γης. Το SWMM χρησιμοποιεί βροχογράφους ώστε να αναπαρίσταται η βροχόπτωση ως δεδομένο εισόδου στο σύστημα.
2. Το τμήμα της επιφάνειας της γης (Land Surface compartment): αναπαρίσταται από μία ή περισσότερες λεκάνες απορροής και δέχεται την κατακρήμνιση από το τμήμα της ατμόσφαιρας είτε με την μορφή βροχής, είτε με τη μορφή χιονιού. Επιπλέον το τμήμα της επιφάνειας αποστέλλει την εκροή στο τμήμα του υπόγειου υδροφορέα με τη μορφή διήθησης, ενώ παράλληλα αποστέλλει την επιφανειακή απορροή και τα ρυπαντικά φορτία στο τμήμα μεταφοράς.
3. Το τμήμα των υπόγειων υδάτων (Groundwater compartment): αυτό δέχεται τη διήθηση και ένα μέρος το μεταφέρει ως εισροή στο τμήμα της μεταφοράς.
4. Το τμήμα της μεταφοράς (Transport compartment): αυτό περιλαμβάνει το δίκτυο μεταφοράς, αγωγούς, κανάλια, αντλίες, ρυθμιστές, δεξαμενές συγκράτησης και επεξεργασίας, το οποίο διαβιβάζει το νερό σε σημεία εκβολής ή σε μέρη επεξεργασίας. Σε αυτό εισέρχονται οι ροές λόγω επιφανειακής απορροής, υπόγειας απορροής αλλά και λόγω πρόσθετων εισροών οριζόμενων από τον χρήστη.

### 3.6 Περιγραφή του SWMM

Η δομή του συνίσταται στην ύπαρξη οκτώ ενότητων οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές ομάδες. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι ενότητες λειτουργιών (service modules) και η δεύτερη περιλαμβάνει ενότητες υδραυλικής- υδρολογίας (hydrology-hydraulics modules) (Τζίμα 2019). Όλες αυτές οι ενότητες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου να ληφθούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι για την προσομοίωση του δικτύου αποχέτευσης.

Τα αντικείμενα που προσομοιώνονται από το μοντέλο SWMM ορίζονται συνοπτικά ως εξής (Rossman 2016):

*Βροχόμετρο:* Πηγή δεδομένων βροχόπτωσης σε μία ή περισσότερες λεκάνες.

*Υπολεκάνη:* Ένα τμήμα γης που δέχεται κατακρήμνιση όπως ορίζεται από το αντίστοιχο βροχόμετρο. Η απορροή που προκύπτει καταλήγει σε κόμβο του συστήματος αποχέτευσης ή σε άλλη υπολεκάνη.

*Υδροφορέας:* Επιφάνεια υπό του εδάφους που δέχεται νερό μέσω διήθησης από την αντίστοιχη υπολεκάνη. Μία ποσότητα από το νερό αυτό μεταφέρεται ως υπόγεια εισροή σε κόμβο του δικτύου αποχέτευσης.

*Χιονόστρωμα:* Το συσσωρευμένο χιόνι που καλύπτει μία υπολεκάνη.

*Μοναδιαίο υδρογράφημα:* Η συνάρτηση απόκρισης που περιγράφει την ανά χρονικό βήμα απορροή η οποία προκύπτει για κάθε μονάδα ενεργού βροχόπτωσης που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της υπολεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση.

*Κόμβος:* Σημείο του δικτύου αποχέτευσης όπου δύο ή περισσότεροι αγωγοί συνδέονται. Οι κόμβοι θεωρείται ότι έχουν αμελητέα δυνατότητα συγκράτησης και αποθήκευσης λυμάτων.

*Κόμβος εκροής:* Το σημείο εξόδου του δικτύου αποχέτευσης όπου το νερό καταλήγει σε ένα υδάτινο σώμα (π.χ. θάλασσα) ή σε εγκατάσταση επεξεργασίας. Ο κόμβος εκροής έχει γνωστό υψόμετρο στάθμης.

*Διαχωριστής:* Σημείο στο δίκτυο αποχέτευσης όπου η ροή διαχωρίζεται σε δύο χωριστούς αγωγούς σύμφωνα με γνωστή σχέση.

*Μονάδα αποθήκευσης:* Μία λεκάνη κατακράτησης, μία τεχνητή λίμνη ή μία κοιλότητα όπου γίνεται αποθήκευση του νερού.

*Αγωγός:* Κανάλι ή σωλήνας από όπου διοχετεύεται το νερό ή τα λύματα μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

*Αντλία:* Συσκευή που αυξάνει το υδραυλικό φορτίο του νερού ή των λυμάτων.

*Οπή:* Άνοιγμα που δημιουργείται σε σημεία του δικτύου για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής, μείωση της πίεσης ή περιορισμό της διερχόμενης παροχής.

*Εκχειλιστής:* Μικρή κατασκευή με στόχο την αύξηση της στάθμης της ροής στα ανάντη ή τον έλεγχο της παροχής στον αγωγό.

*Αγωγός εξόδου:* Ο αγωγός που συνδέεται με τον κόμβο εκροής.

*Αγωγός με ανώμαλη γεωμετρία:* Οι περισσότεροι αγωγοί έχουν ορθογώνιες, τραπεζοειδείς, κυκλικές διατομές. Στην περίπτωση ανώμαλης γεωμετρίας, ορίζεται κατάλληλα από το χρήστη η μεταβολή του βάθους σε σχέση με την απόσταση.

*Κανόνες ελέγχου:* Συνθήκες IF - THEN - ELSE που καθορίζουν πότε θα πραγματοποιηθούν συγκεκριμένες ενέργειες ελέγχου (π.χ. άνοιγμα ή κλείσιμο αντλίας ανάλογα με την τιμή του βάθους ροής σε έναν κόμβο).

*Ρύπος:* Ουσία που ενδεχομένως να έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή/και στο περιβάλλον. Ο ρύπος εισέρχεται στο δίκτυο απευθείας ή μέσω έκπλυσης από την επιφάνεια.

*Χρήση γης:* Οι δραστηριότητες και επεμβάσεις των ανθρώπων σε ένα τμήμα γης. Με βάση τις χρήσεις γης μελετάται η συσσώρευση των ρύπων και η έκπλυσή τους.

*Πρακτική LID:* Οι πρακτικές Low Impact Development εφαρμόζονται για τη μείωση της επιφανειακής απορροής μέσω υποβοηθούμενης διήθησης (π.χ. πορώδες οδόστρωμα, πράσινες στέγες κ.ά.).

*Συνάρτηση ρύπου:* Μία συνάρτηση που δίνεται από το χρήστη και περιγράφει τη μείωση των ρύπων σε σχέση με μεγέθη όπως η παροχή, το βάθος ροής κ.ά.

*Καμπύλη:* Μία πινακοποιημένη σχέση μεταξύ διάφορων ποσοτήτων (π.χ. καμπύλη παροχής και υδραυλικού φορτίου για μία αντλία).

*Χρονοσειρά:* Μία πινακοποιημένη σχέση που περιγράφει τη μεταβολή μίας ποσότητας με το χρόνο (π.χ. χρονοσειρά βροχόπτωσης).

*Χρονική κατανομή:* Συντελεστές που καθορίζουν τη χρονική κατανομή μίας ποσότητας σε ένα διάστημα (π.χ. μηνιαία/ημερήσια/ωριαία χρονική κατανομή)

Για την απλοποίηση των ενεργειών του χρήστη, δηλαδή το σχεδιασμό του δικτύου, την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων και τους υπολογισμούς που απαιτούνται για την προσομοίωση, τα αντικείμενα του SWMM 5.1 διακρίνονται σε οπτικά (visual objects) και μη οπτικά (non visual objects).

### 3.7 Υπολογιστικές μέθοδοι

#### 3.7.1 Εισαγωγή

Το SWMM είναι ένα φυσικά δομημένο, διακριτού χρόνου λογισμικό προσομοίωσης. Κάνει χρήση των αρχών διατήρησης της μάζας, της ενέργειας και της ορμής όπου αυτό είναι απαραίτητο. Το υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζει συνοπτικά τις μεθόδους που χρησιμοποιεί το SWMM για τη μοντελοποίηση της ποιότητας και της ποσότητας της απορροής μέσα από τις παρακάτω φυσικές διαδικασίες:

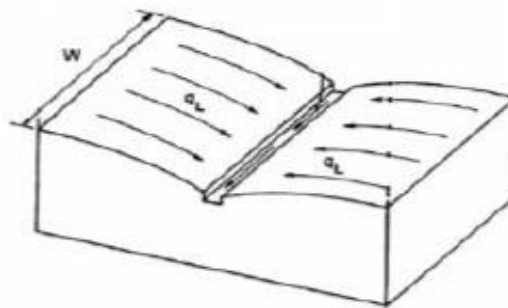
- Επιφανειακή απορροή



- Υπόγεια νερά
- Διόδευση απορροής
- Διόδευση της ποιότητας των υδάτων
- Διήθηση
- Τήξη χιονιού
- Επιφανειακή λίμναση

### 3.7.2 Επιφανειακή απορροή στο SWMM

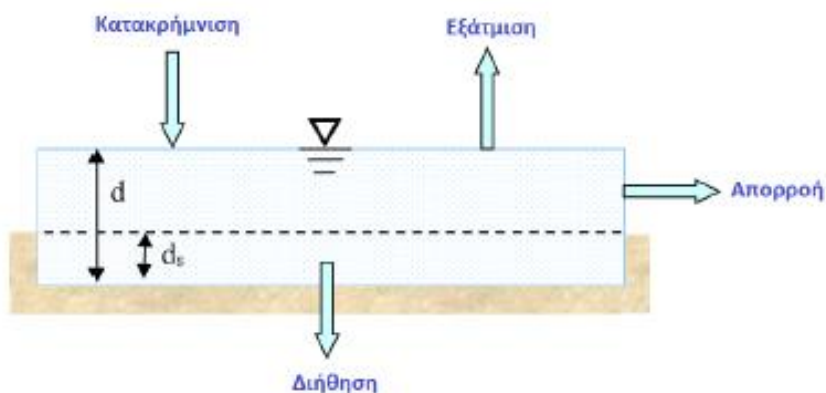
Η κατακρήμνιση αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την προσομοίωση της βροχής –απορροής- ποιότητας. Τα δεδομένα της κατακρήμνισης μετατρέπονται από το SWMM σε επιφανειακή απορροή. Επειδή το SWMM είναι ένα κατανεμημένο δυναμικό μοντέλο, επιτρέπει σε μια περιοχή μελέτης να υποδιαιρείται σε οποιεσδήποτε περιοχές ακανόνιστου σχήματος, ώστε να καταγράψει καλύτερα την επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας στην τοπογραφία, τις οδούς αποστράγγισης, την κάλυψη της γης και τα χαρακτηριστικά του εδάφους στην παραγωγή απορροής. Συνεπώς, η παραγωγή απορροής προσδιορίζεται από την μια υποπεριοχή την άλλη (Rossman 2016). Το SWMM διαχειρίζεται την κάθε υπολεκάνη ως ορθογώνια επιφάνεια, με ομοιόμορφη κλίση  $S$  και πλάτος  $W$ , που αποστραγγίζεται σε ένα μοναδικό κανάλι εξόδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Ιδεατή αναπαραγωγή υπολεκάνης στο SWMM  
Πηγή: Rossman (2016)

Η επιφανειακή απορροή θεωρεί την λεκάνη ως μια μη γραμμική δεξαμενή. Σύμφωνα με τη μοντελοποίηση αυτή, εισροές στην υπολεκάνη θεωρούνται οι κατακρημνίσεις, ενώ η εξάτμιση και η διήθηση αποτελούν τις απώλειες. Η καθαρή περίσσεια λιμνάζει στην κορυφή της επιφάνειας της υπολεκάνης σε βάθος  $d$ . Το λιμνάζον νερό πάνω από το βάθος αποθήκευσης  $d_s$  μπορεί να μετατραπεί σε απορροή  $q$ . Η επιφανειακή συγκράτηση αποθήκευση αντιπροσωπεύει

τις αρχικές απορροφήσεις βροχοπτώσεων, όπως, υποκλοπή με επίπεδες στέγες και βλάστηση, επιφανειακή λίμναση κ.α. Παραστατικά αυτό περιγράφεται στο Σχήμα 3.2



Σχήμα 3.2: Μη γραμμικό μοντέλο δεξαμενής μιας υπολεκάνης στο SWMM  
Πηγή: Rossman (2016)

### 3.7.2.1 Διαμερισμός Υπολεκανών

Οι αστικές λεκάνες είναι συνήθως μεγάλες σε έκταση και όχι ομοιόμορφες όσο αφορά τις χρήσεις γης. Δηλαδή οι αστικές περιοχές συνήθως περιέχουν ένα μείγμα τύπων επιφάνειας γης, το οποίο μπορεί εύκολα να χωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες: διαπερατές επιφάνειες (π.χ. χλοοτάπητες, αγρούς και δασικές εκτάσεις) που επιτρέπουν τη διείσδυση βροχοπτώσεων στο έδαφος και αδιαπέραστες επιφάνειες (π.χ. στέγες, , και χώροι στάθμευσης) πάνω από τους οποίους δεν υπάρχει διείσδυση. Τα μέρη αυτά μπορούν να διαχωριστούν από το SWMM και ο χρήστης καλείται μόνο να θέσει το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας σε κάθε υπολεκάνη, ενώ στη συνέχεια με τη μεταβλητή %Zero-Imperv έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την επιφανειακή συγκράτηση στο αδιαπέρατο μέρος. Στο Σχήμα 3.3 περιγράφονται παραστατικά οι τρεις πιθανοί τύποι υποπεριοχών στην κάθε υπολεκάνη (Rossman 2016).



Σχήμα 3.3: Είδη υποπεριοχών σε μια υπολεκάνη στο SWMM  
Πηγή: Rossman (2016)

Εννοιολογικά, αυτές οι τρεις υποπεριοχές ενσωματώνονται στην ιδεατή υπολεκάνη όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Βεβαίως στην πραγματικότητα οι περιοχές δεν θα ευθυγραμμιστούν με αυτόν τον τρόπο ούτε θα είναι αναγκαστικά συμπαγές και συνδεδεμένο. Η διάταξη που χρησιμοποιείται εδώ είναι απλώς μια ευκολία μοντελοποίησης. Τα σύμβολα A1, A2 και A3 αναφέρονται στην διαπερατή υποπεριοχή και σε δύο τύπους αδιαπέρατων υποπεριοχών, με και χωρίς αποθήκευση κατάθλιψης, αντίστοιχα και απομακρύνουν την απορροή τους ανεξάρτητα το ένα από το άλλο στην ίδια θέση εξόδου.



Σχήμα 3.4: Ιδεατός διαχωρισμός υπολεκάνης  
Πηγή: Rossman (2016)

#### 3.7.2.2 Σχηματοποίηση υπολεκανών

Οι περισσότερες περιοχές μελέτης θα απαιτήσουν κάποιο επίπεδο διακριτοποίησης σε πολλαπλές υπολεκάνες προκειμένου να χαρακτηριστεί σωστά η χωρική μεταβλητότητα στις οδούς αποστράγγισης, τις επιφανειακές ιδιότητες και τις συνδέσεις σε σωλίνες και κανάλια αποστράγγισης. Για τον σωστό προσδιορισμό των υπολεκανών, οι οποίες συμπίπτουν με τα όρια αποστράγγισης, είναι απαραίτητα, εκτός από τον τοπογραφικό χάρτη και τα σχέδια του αποχετευτικού συστήματος.

#### 3.7.2.3 Εκτίμηση παραμέτρων υπολεκανών

##### α) Έκταση υπολεκάνης

Καταρχήν, η περιοχή της λεκάνης απορροής και της υποπεριοχής μπορεί να οριστεί με την κατασκευή χωρισμάτων αποστράγγισης σε τοπογραφικούς χάρτες. Στην πράξη, αυτό δεν μπορεί να είναι πάντα εύκολο εξαιτίας της έλλειψης λεπτομερών υψομετρικών πληροφοριών και της ύπαρξης άγνωστων εισροών και εκροών. Αυτό μπορεί να επισημανθεί ιδιαίτερα, όταν ο μετρημένος όγκος απορροής υπερβαίνει τον μετρημένο όγκο βροχόπτωσης. Ο όγκος

βροχόπτωσης, σαφώς, σπάνια μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια σε όλα τις υποπεριοχές (Rossman 2016).

#### β) Αδιαπερατότητα

Η αδιαπερατότητα των λεκανών απορροής αποτελεί ίσως τον πιο σημαντικό παράγοντα, που χρήζει καθορισμού, προκειμένου να αποσαφηνιστεί η επίδραση της αστικοποίησης στην ποσότητα και την ποιότητα των απορροών. Το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής της υπολεκάνης είναι εφικτό να υπολογιστεί με σχετικά καλή ακρίβεια, από τη στιγμή που αναφερόμαστε σε ψηφιοποιημένες περιοχές με κάποιο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών. Μια προσέγγιση για την εκτίμηση της αδιαπέρατης έκτασης σε μεγάλες εκτάσεις με πολλαπλές χρήσεις γης είναι η σύνδεση του ποσοστού αδιαπέρατης περιοχής με κάθε κατηγορία χρήσης γης. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το ποσοστό κάθε χρήσης γης μέσα σε μια υπολεκάνη, είναι εφικτό να υπολογιστεί το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής.

## 4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

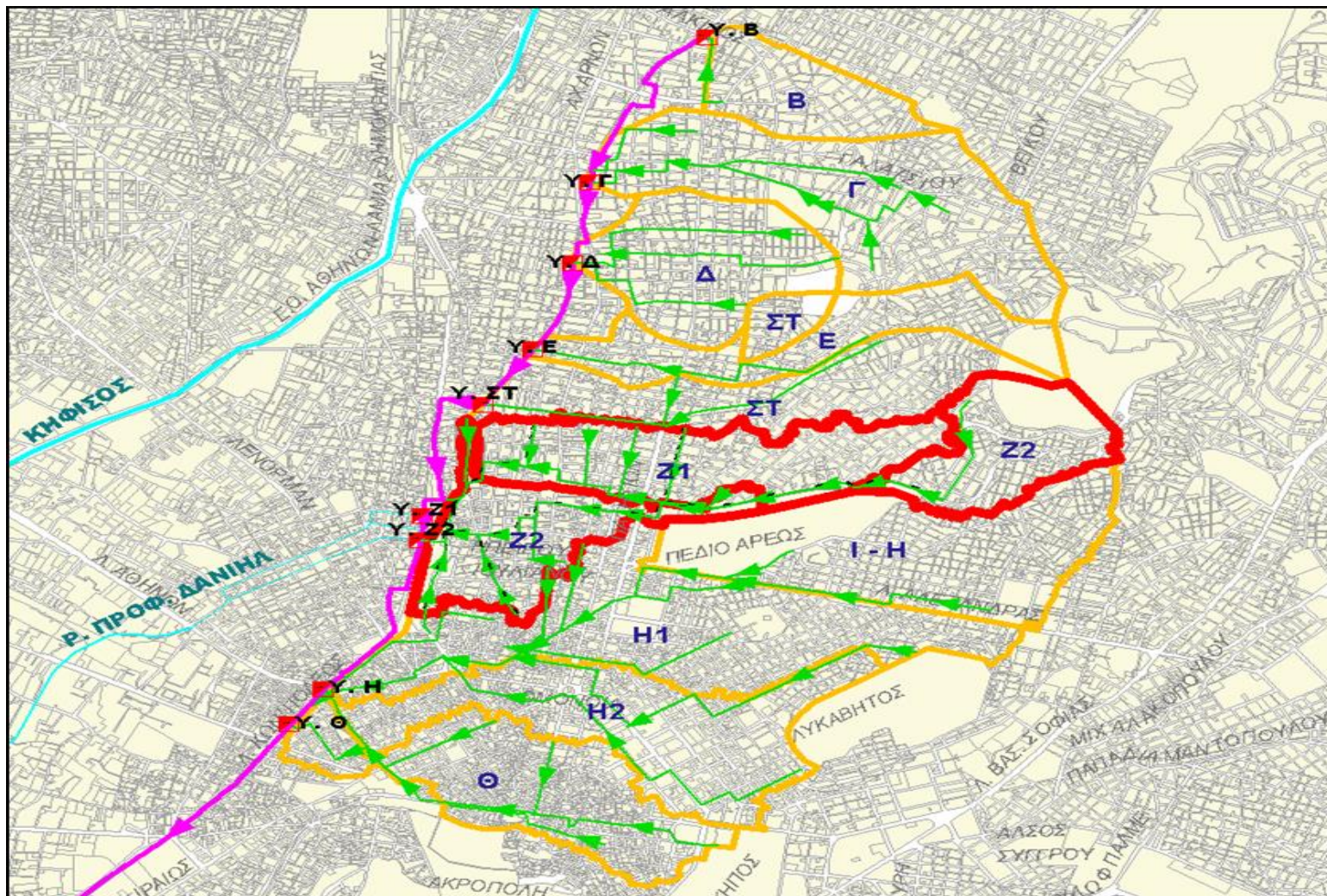
### 4.1 Γενική περιγραφή

Το παλαιότερο τμήμα του αποχετευτικού δικτύου των Αθηνών αποτελεί το παντορροϊκό τμήμα του δικτύου (Σχήμα 4.1). Χωρίζεται στις υπολεκάνες: Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ, Ζ1, Ζ2, Η1, Η2 και Θ. Η λεκάνη απορροής ομβρίων της περιοχής αυτής είναι 13,1 km<sup>2</sup>, ενώ των ακαθάρτων ανέρχεται σε 12,50 km<sup>2</sup>. Ο αποδέκτης των ακαθάρτων της περιοχής αυτής είναι ο Κ.Α.Α. , ενώ αποδέκτης των ομβρίων είναι το ρέμα του Προφ. Δανιήλ και ο ποταμός Κηφισός.

Όπως αναφέρεται στις διάφορες μελέτες που έχουν εκπονηθεί μέχρι σήμερα για το αποχετευτικό πρόβλημα της Αθήνας, επί του Κ.Α.Α. προβλεπόταν εννέα υπερχειλιστές από τους οποίους δεν έχει κατασκευαστεί ο υπερχειλιστής Η. Από τα φρεάτια των υπερχειλιστών ξεκινούν οι αγωγοί υπερχείλισης Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ, Ζ1 και Ζ2.

Οι εκβολές των αγωγών υπερχείλισης Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ είναι στον π. Κηφισό και στο ρέμα Προφήτη Δανιήλ εκβάλλουν οι υπερχειλιστές Ζ1 έως Ζ2.





Σχήμα 4.1: Απεικόνιση Παντορροϊκού Δικτύου Αθηνών

Η συγκεκριμένη περιοχή είχε γίνει αντικείμενο για την εφαρμογή ενός πιλοτικού έργου της ΕΥΔΑΠ στις ζώνες Z1 και Z2 του παντορροϊκού δικτύου, εκτάσεως 2,31 και 3,43 km<sup>2</sup> αντίστοιχα. Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν για την εφαρμογή της μεθοδολογίας HYDROPLAN (προσδιορισμός των απαιτούμενων ενεργειών με σκοπό την πρόληψη των ενδεχόμενων αστοχιών του δικτύου) οι εν λόγω ζώνες ήταν λόγω της ασάφειας της λειτουργίας του δικτύου και της προβληματικής λειτουργίας των υπερχειλιστών.

Στην μεν πρώτη περίπτωση οι υφιστάμενες μελέτες ήταν πολύ παλαιές και υπέστησαν στην πορεία πολλές τροποποιήσεις. Ακόμα προβλεπόμενα εκ των μελετών τμήματα του δικτύου ομβρίων δεν κατασκευάστηκαν ποτέ, ενώ σημαντικά τμήματα κυρίως του δευτερεύοντος δικτύου ακαθάρτων, κατασκευάστηκαν από το Δήμο Αθηναίων και σε πολλές περιπτώσεις τα σχέδια των εν λόγω τμημάτων δεν δόθηκαν στην ΕΥΔΑΠ, προκειμένου να ενημερώσει το αρχείο του κατασκευασμένου δικτύου.

Στη δεύτερη περίπτωση από τους δύο υπερχειλιστές, ο Z1 δε λειτουργούσε καθόλου, (ο αγωγός υπερχείλισης Z1 ήταν ταπωμένος στη κεφαλή του), ενώ ο Z2 υπολειτουργούσε (από τον υπερχειλιστή Z2 ξεκινούν δύο αγωγοί υπερχείλισης, ο παλαιός ο οποίος ήταν σε λειτουργία και ο νέος ο οποίος ήταν ταπωμένος στη κεφαλή του). Ο παλαιός αγωγός υπερχείλισης Z2 εκβάλλει κατευθείαν στο Ρ. Προφήτη Δανιήλ, ενώ ο αγωγός υπερχείλισης Z1 και ο νέος αγωγός υπερχείλισης, μετά τη συμβολή τους, εκβάλλουν με κοινό αγωγό στο Ρ. Προφήτη Δανιήλ. Ο λόγος για τη μη λειτουργία των παραπάνω αγωγών, ήταν η διακοπή της συνέχειας του κοινού αγωγού υπερχείλισης στο ύψος της οδού Λένορμαν (Hydroplan-EU 2006).

Στην παρούσα εργασία ως περιοχή μελέτης επιλέχτηκε η ζώνη Z2 του παντορροϊκού δικτύου εκτάσεως 66,51 km<sup>2</sup>, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.





Σχήμα 4.2: Δορυφορική απεικόνιση Ζ2' Ζώνης Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών (Google Earth)



#### 4.2 Περιγραφή της πορείας των εργασιών για την περιοχή μελέτης και το αποχετευτικό δίκτυο

Για την επιτυχή μοντελοποίηση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν πινακίδες, οι οποίες απεικονίζουν τους αγωγούς των ακαθάρτων, τους αγωγούς των ομβρίων, παντοροϊκούς αγωγούς, τα φρεάτια του δικτύου, τα ονόματά τους, καθώς και τα υψόμετρα στέψης και πυθμένα αυτών, τα μήκη και τις κλίσεις των αγωγών, το είδος των αγωγών και τη διάμετρο και το υψόμετρο τους και τέλος τα οικοδομικά τετράγωνα.

Η πορεία των εργασιών ξεκίνησε με:

- Την εισαγωγή των πινακίδων στο λογισμικό ArcGIS.
- Την ψηφιοποίηση των οικοδομικών τετραγώνων, των φρεατίων και των αγωγών.
- Ακόμα με τη βοήθεια του λογισμικού AutoCAD έγινε η διχοτόμηση των οικοδομικών τετραγώνων (υδροκρίτες).
- Ενώ στη συνέχεια με βάση τους κανόνες της αστικής υδρολογίας σχηματίστηκαν οι αστικές λεκάνες απορροής στο ArcGIS.
- Το ψηφιοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο (αστικές λεκάνες απορροής, φρεάτια, αγωγοί) εισήχθη στο λογισμικό inr.PINS, με τη βοήθεια του οποίου εξήχθη σε μορφή κατάλληλη για το λογισμικό SWMM.
- Για τις περιόδους επαναφοράς  $T = 2, 5, 10, 25, 50$  και για βροχή διάρκειας  $t = 1, 2, 6, 12$  έγιναν τα υετογραφήματα με χρονικό βήμα 10 λεπτών. Για τη δημιουργία των υετογραφημάτων ακολουθήθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων υψών βροχής. Κατόπιν εισήχθησαν στο λογισμικό SWMM.
- Έγινε εκτίμηση των απορροών ξηρού καιρού και εισαγωγή αυτών στο λογισμικό SWMM.
- Στη συνέχεια έγινε βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου με βάση μια καταγεγραμμένη βροχή.
- Έγινε προσομοίωση του συστήματος, για όλες τις περιόδους επαναφοράς και όλες τις διάρκειες, ώστε να δούμε πως αποκρίνεται το σύστημα και αν και που πλημμυρίζει.
- Ακολούθησε καθορισμός των παραμέτρων των Μέτρων Χαμηλής Επίπτωσης (LIDs).
- Δημιουργήθηκαν 7 σενάρια LIDs, για γεγονότα με περίοδο επαναφοράς  $T=10$  και διάρκεια  $t=1$  και 12, με τα οποία εκτελέστηκε προσομοίωση, ώστε να δούμε πως αντιδρά το μοντέλο και αν συνεχίζει να πλημμυρίζει.

#### 4.3 Ψηφιοποίηση και αναπαράσταση του αποχετευτικού δικτύου

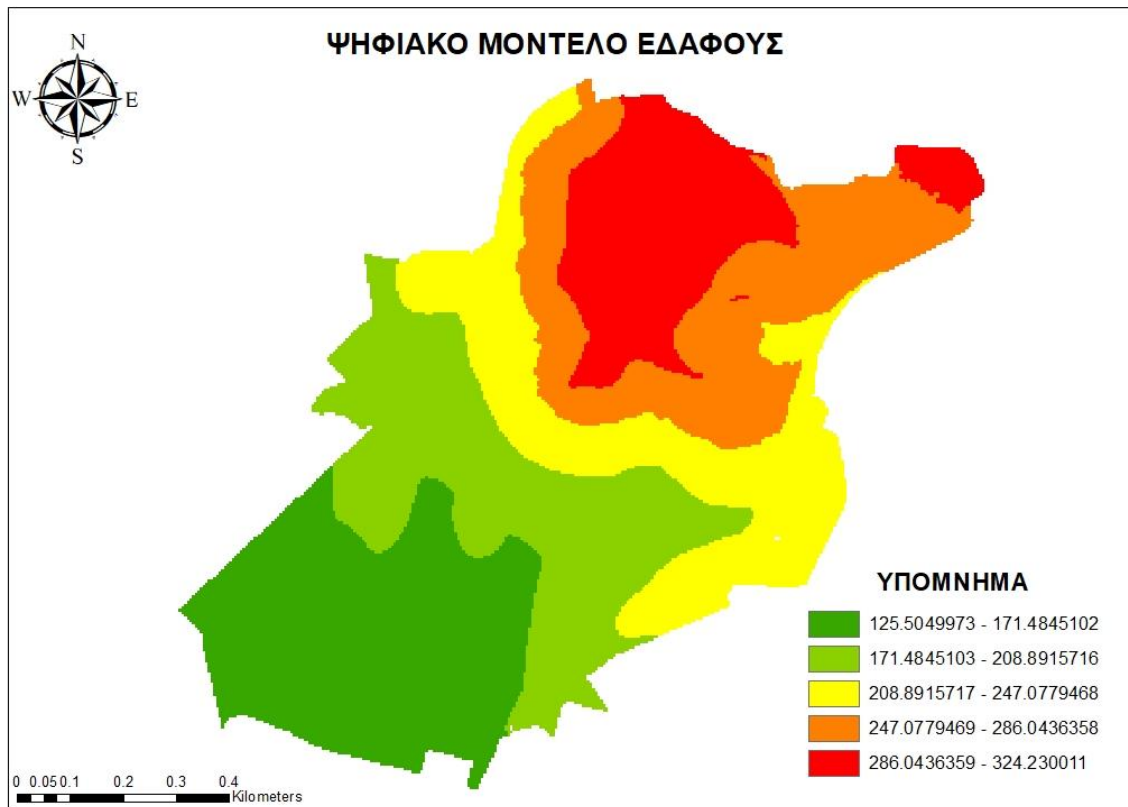
Τα στοιχεία, τα οποία ψηφιοποιήθηκαν με τα λογισμικά Qgis και ArcGIS, ήταν αρχικά η Ζ2' Ζώνη του Παντορροϊκού δικτύου Αθηνών, τα οικοδομικά τετράγωνα της Ζ2' Ζώνης του Παντορροϊκού δικτύου Αθηνών, οι αγωγοί του αποχετευτικού δικτύου καθώς και τα φρεάτια του αποχετευτικού δικτύου. Όλα τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3: Αποχετευτικό δίκτυο Ζ2' Ζώνης Παντορροϊκού δικτύου Αθηνών

#### 4.4 Χάραξη αστικών λεκανών απορροής

Για την δημιουργία φυσικών λεκανών απορροής αυτό που λαμβάνεται υπόψη είναι ο υδροκρίτης, ο οποίος καθορίζεται μόνο από την τοπογραφία της περιοχής και για τη χάραξη του βασιζόμαστε στις ισοψείς καμπύλες. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μας με ελάχιστο υψόμετρο τα 125 m, μέγιστο τα 324 m και ανάλυσης 5x5 m.



Σχήμα 4.4: Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους περιοχής μελέτης

Ωστόσο για την σχεδιασμό των αστικών λεκανών απορροής η τοπογραφία δεν αρκεί. Αρχικά λοιπόν κάθε οικοδομικό τετράγωνο χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα φέροντας τις διχοτόμους στις τέσσερις γωνίες του. Οι διχοτόμοι λοιπόν αυτές λειτουργούν ως υδροκρίτες και με αυτό τον τρόπο αποχετεύονται τα όμβρια κάθε τμήματος μιας επιφάνειας ενός οικοδομικού τετραγώνου στα φρεάτια παντοροϊκού. Για να προσδιοριστεί το φρεάτιο εφαρμόζονται οι ακόλουθες αρχές:

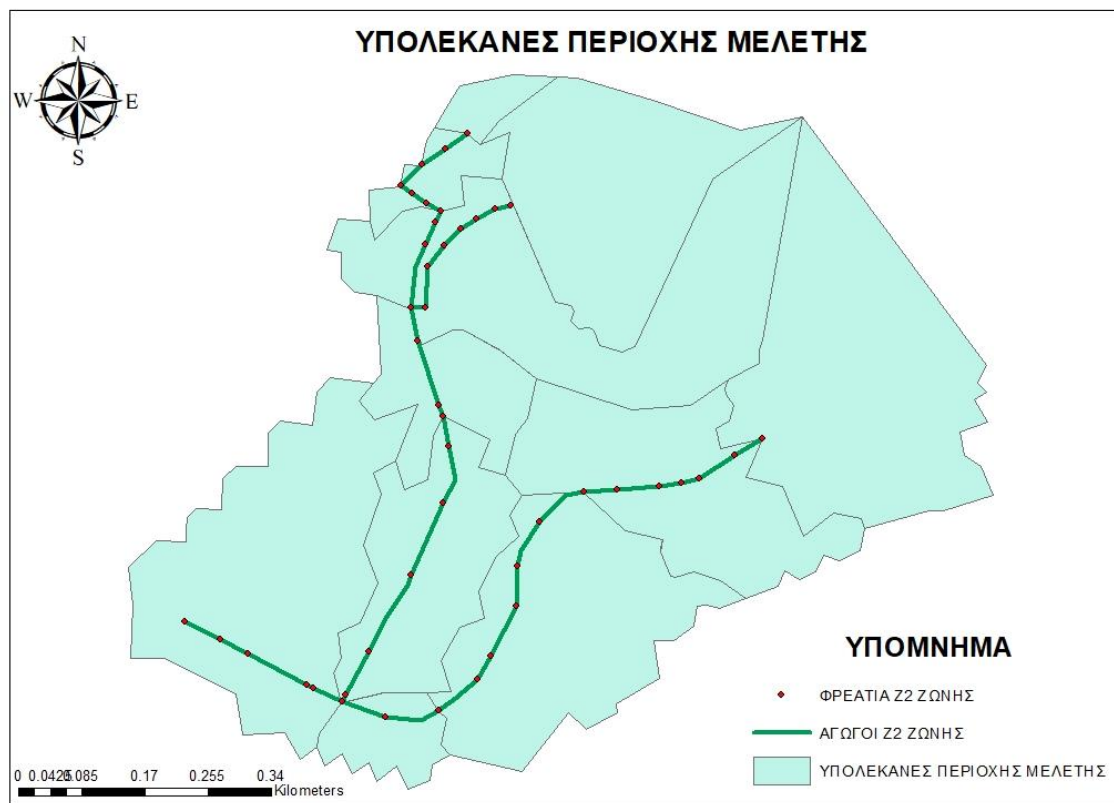
- Κάθε σημείο ενός οικοδομικού αποχετεύεται στο πλησιέστερο ρείθρο της πλησιέστερης οδού
- Η ροή ακολουθεί τη μέγιστη κλίση του εδάφους
- Ως σημείο εξόδου μιας υπολεκάνης θεωρείται ένα φρεάτιο εισόδου (Τσακίρης 2010, Κουτσογιάννης 2011).

Ακολουθώντας στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται χαραγμένοι οι υδροκρίτες των οικοδομικών τετραγώνων της Ζ2' Ζώνης του Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. Η χάραξη τους έγινε με την βοήθεια του λογισμικού Autocad.



Σχήμα 4.5: Υδροκριτικές γραμμές οικοδομικών τετραγώνων

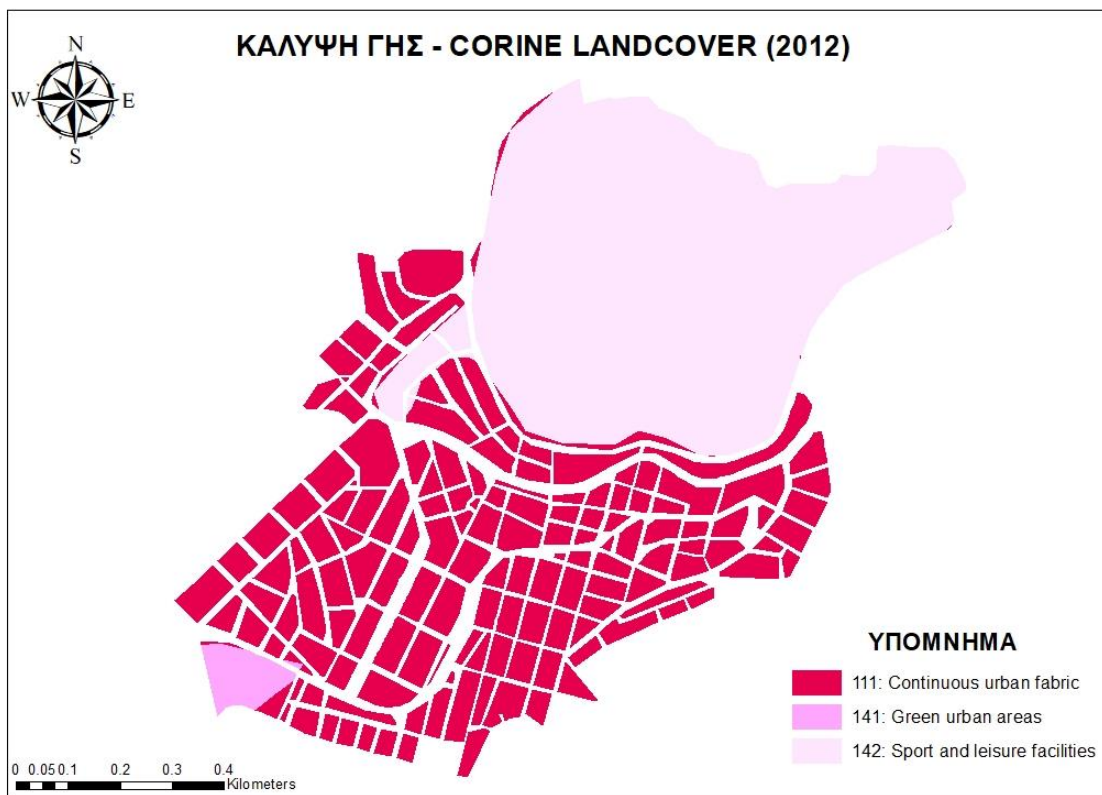
Τέλος στο λογισμικό ArcMap έγινε η ενοποίηση των αστικών λεκανών απορροής. Για την ενοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι υδροκρίτες κάθε οικοδομικού τετραγώνου σε συνδυασμό με το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης. Η ενοποίηση έγινε σύμφωνα με το φρεάτιο που αποχετεύεται το κάθε τμήμα των οικοδομικών τετραγώνων και τα αποτελέσματα εμφανίζονται παρακάτω στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Σχηματισμένες αστικές λεκάνες απορροής Ζ2' Ζώνης Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών

#### 4.5 Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για την υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής. Στην περιοχή μελέτης μας η κύρια χρήση γης είναι η συνεχής αστική δόμηση, υπάρχουν ελάχιστοι χώροι πρασίνου και χώροι άθλησης και αναψυχής. Αναλυτικά όλα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7 όπου αποτελεί τον χάρτη χρήσεων γης της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4.7: Χάρτης χρήσεων γης Ζ2' Ζώνης Παντοροϊκού δικτύου Αθηνών ( Corine Landcover 2012)

#### 4.6 Μοντελοποίηση αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό inr.PINS

Το λογισμικό inr. PINS είναι ένα «ελεύθερο» πρόγραμμα, το οποίο δημιουργήθηκε, με σκοπό να παρέχει την δυνατότητα σε μηχανικούς υδρολογίας και σε χρήστες των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, να μετατρέπουν τα αρχεία τους σε κατάλληλη μορφή, ώστε να μπορούν να τα εισάγουν στο λογισμικό SWMM και να πραγματοποιήσουν τις προσομοιώσεις που επιθυμούν.

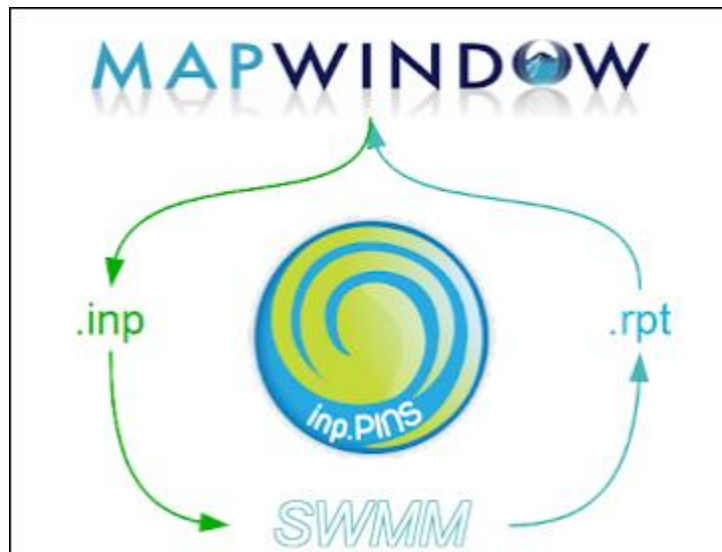
Το inr.PINS έχει σχεδιαστεί, ώστε να ενσωματώνει το SWMM με Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Η κύρια ιδέα είναι να συνδέονται τα οπτικά αντικείμενα του SWMM μεταξύ αυτών των δύο πλατφορμών και να μην συμπεριλαμβάνονται τα αριθμητικά δεδομένα που δεν είναι απαραίτητα για τον ορισμό αυτών των αντικειμένων. Συνεπώς πρέπει να γίνεται μια επιπρόσθετη δουλειά στο SWMM αναφορικά με τα αριθμητικά δεδομένα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, το inrPINS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αρχείου εισόδου SWMM (.inr) με τις πληροφορίες που περιέχονται σε αρχεία GIS και, μετά από την



ανάλυση του SWMM, αυτό το λογισμικό δημιουργεί αρχεία μορφής (.shp) με το αρχείο του αποτελέσματος του SWMM (.rpt), το οποίο μπορεί να συνδυαστεί με Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM).

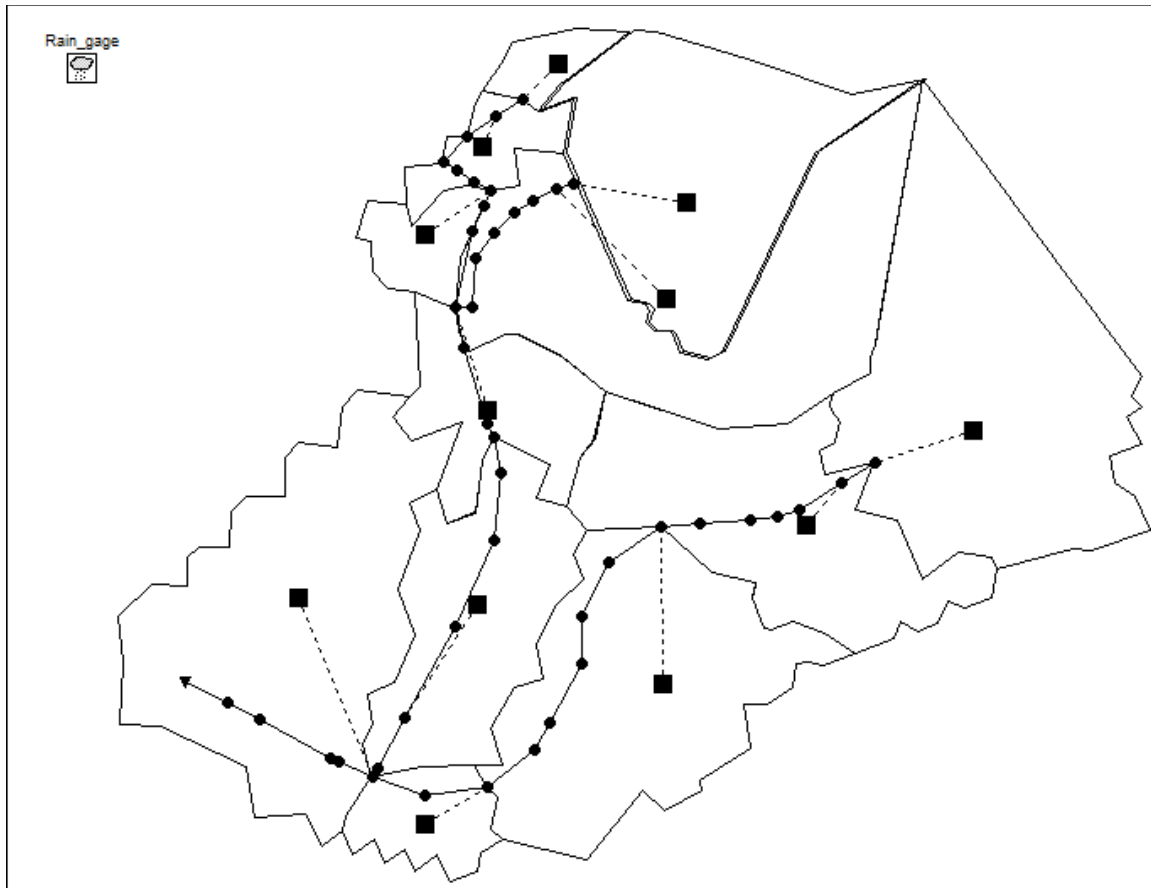
Συνεπώς, στην παρούσα εργασία μέσω του λογισμικού inp.PINS μοντελοποιήθηκε το αρχικό αποχετευτικό σύστημα που ήταν απλώς πολύγωνα, σημεία και γραμμές ώστε να αναγνωρίζονται από το λογισμικό SWMM οι λεκάνες απορροής, τα φρεάτια και οι αγωγοί ως μέλη αποχετευτικού συστήματος.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα λειτουργίας inpPINS  
Πηγή: <https://sites.google.com/site/inppins/guide>

#### 4.7 Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο στο SWMM

Με την εξαγωγή του project από το inp.PINS και την εισαγωγή στο λογισμικό SWMM έχουμε μοντελοποιημένο το αποχετευτικό δίκτυο της Ζ2' Ζώνης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών. Παρακάτω στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο όπως αυτό εμφανίζεται στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού SWMM.



Σχήμα 4.9: Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο στο λογισμικό SWMM

#### 4.8 Εισαγωγή δεδομένων αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό SWMM

Μετά το τέλος των χαρτογραφικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον GIS και τη χρήση του λογισμικού *inp.PINS* για τη μοντελοποίηση του αποχετευτικού δικτύου και την εξαγωγή του στο λογισμικό SWMM ακολούθησε η διαδικασία εισαγωγής των παραμέτρων στο λογισμικό. Οι παράμετροι που εισήχθησαν στο λογισμικό αφορούσαν τα φρεάτια του δικτύου, τους αγωγούς του δικτύου καθώς και τις σχηματισμένες λεκάνες απορροής. Για τις λεκάνες, οι παράμετροι που εισήχθησαν ήταν:

- Το εμβαδόν των λεκανών, το οποίο είχε υπολογιστεί από το λογισμικό ArcGIS.
- Το πλάτος της επίγειας ροής, το οποίο είναι το αποτέλεσμα του λόγου του εμβαδού προς το χερσαίο μήκος επίγειας ροής, το οποίο είχε επίσης υπολογιστεί πρωτίτερα με τη χρήση του ArcGIS.
- Οι κλίσεις κάθε υπολεκάνης, οι οποίες επίσης ήταν οι μέσες κλίσεις κάθε λεκάνης υπολογισμένες στο ArcGIS.



- Το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας κάθε λεκάνης, το οποίο υπολογίστηκε, αφού πρώτα μετρήθηκαν τα εμβαδά των στεγών και των δρόμων κάθε λεκάνης, ως ο λόγος των εμβαδών αυτών προς το εμβαδόν κάθε εξεταζόμενης λεκάνης αντίστοιχα πολλαπλασιασμένος επί 100.
- Ο συντελεστής Manning της αδιαπέρατης επιφάνειας για κάθε υπολεκάνη βάσει του οποίου έγινε η βαθμονόμηση.
- Ο συντελεστής Manning της διαπερατής επιφάνειας για κάθε υπολεκάνη, ο οποίος επίσης χρησιμοποιήθηκε στη βαθμονόμηση.
- Επιφανειακή αποθήκευση: Η επιφανειακή αποθήκευση σε διαπερατά εδάφη, Dstore-Perv mm, όπως και σε αδιαπέρατα εδάφη, Dstore-Imperv, mm χρησιμοποιήθηκε στη βαθμονόμηση (Bellos et al. 2017).
- Μέθοδος Διήθησης: Η μέθοδος διήθησης που επιλέχθηκε για όλες τις υπολεκάνες απορροής είναι αυτή της SCS και του αριθμού καμπύλης CN. Αφού ορίστηκε η κατηγορία εδάφους, σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης κάθε υπολεκάνης, επιλέχθηκε ο αριθμός καμπύλης CN από τους αντίστοιχους πίνακες (Τσιχριντζής 1999).

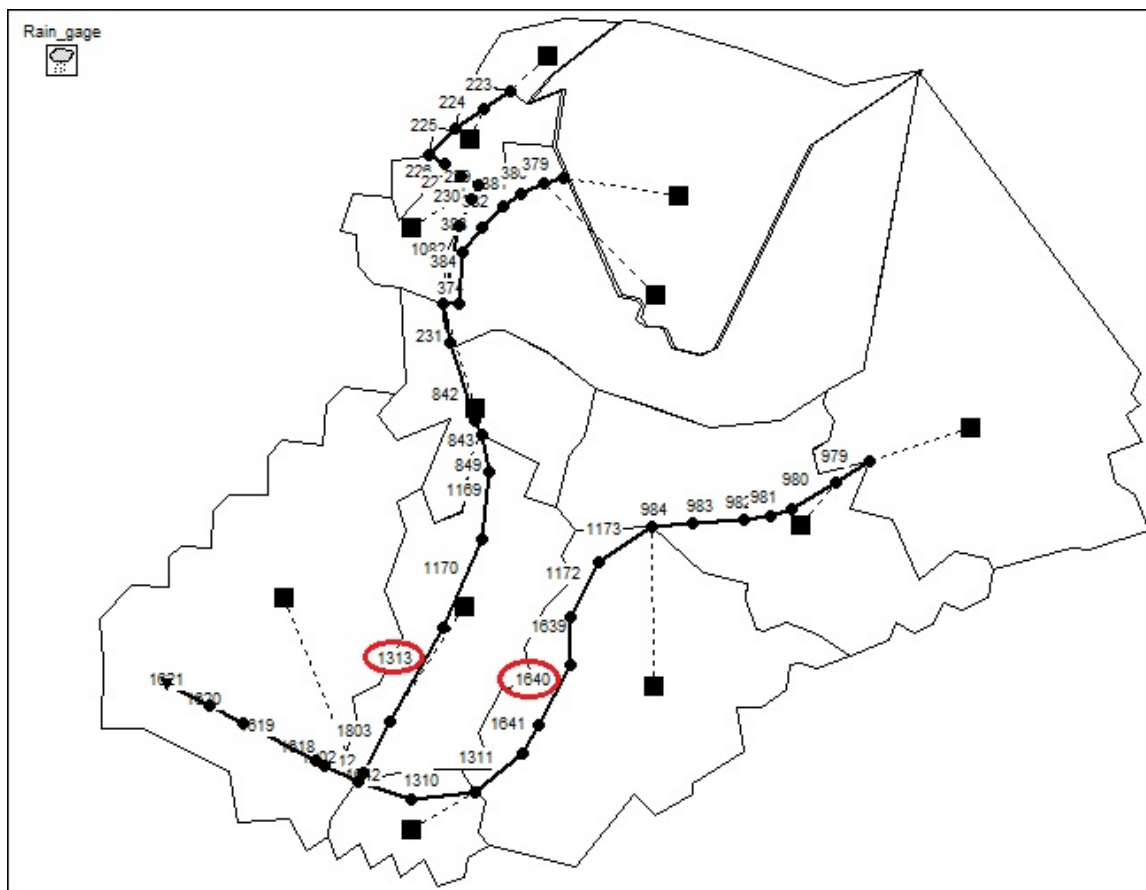
Η εισαγωγή των παραμέτρων των φρεατίων του αποχετευτικού δικτύου ήταν η ακόλουθη διαδικασία. Για κάθε φρεάτιο λουπόν τα στοιχεία που εισήχθησαν είναι τα ακόλουθα:

- Invert Elevation το υψόμετρο πυθμένα κάθε φρεατίου
- Το μέγιστο βάθος νερού στον κόμβο, το οποίο προέκυψε ως η διαφορά των υψομέτρων του πυθμένα του φρεατίου και του υψομέτρου του εδάφους.
- Τέλος τα inflows αν υπήρχαν (ο τρόπος υπολογισμού έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2).

Τελευταίο κομμάτι ήταν η εισαγωγή των στοιχείων των αγωγών, με απαραίτητες παραμέτρους να είναι:

- Το φρεάτιο εισόδου
- Το φρεάτιο εξόδου
- Το μήκος του αγωγού
- Το είδος του αγωγού καθώς στην περιοχή μελέτης υπήρχαν ωοειδείς αλλά και κάποιοι κυκλικοί αγωγοί.
- Ο συντελεστής Manning για τους κυκλικούς αγωγούς επιλέχθηκε 0.013, ενώ για τους ωοειδείς 0.014 (Τσιχριντζής 1999) και σε ορισμένους αγωγούς, που βρίσκονταν κοντά στους αγωγούς 1313 και 1640 (Σχήμα 4.10), με βάση τους οποίους έγινε η βαθμονόμηση.
- Για τους κυκλικούς αγωγούς η διάμετρος.

- Τέλος το μέγιστο βάθος του αγωγού.



Σχήμα 4.10: Αγωγοί βαθμονόμησης 1313 και 1640

#### 4.9 Εκτίμηση παροχών ξηρού καιρού

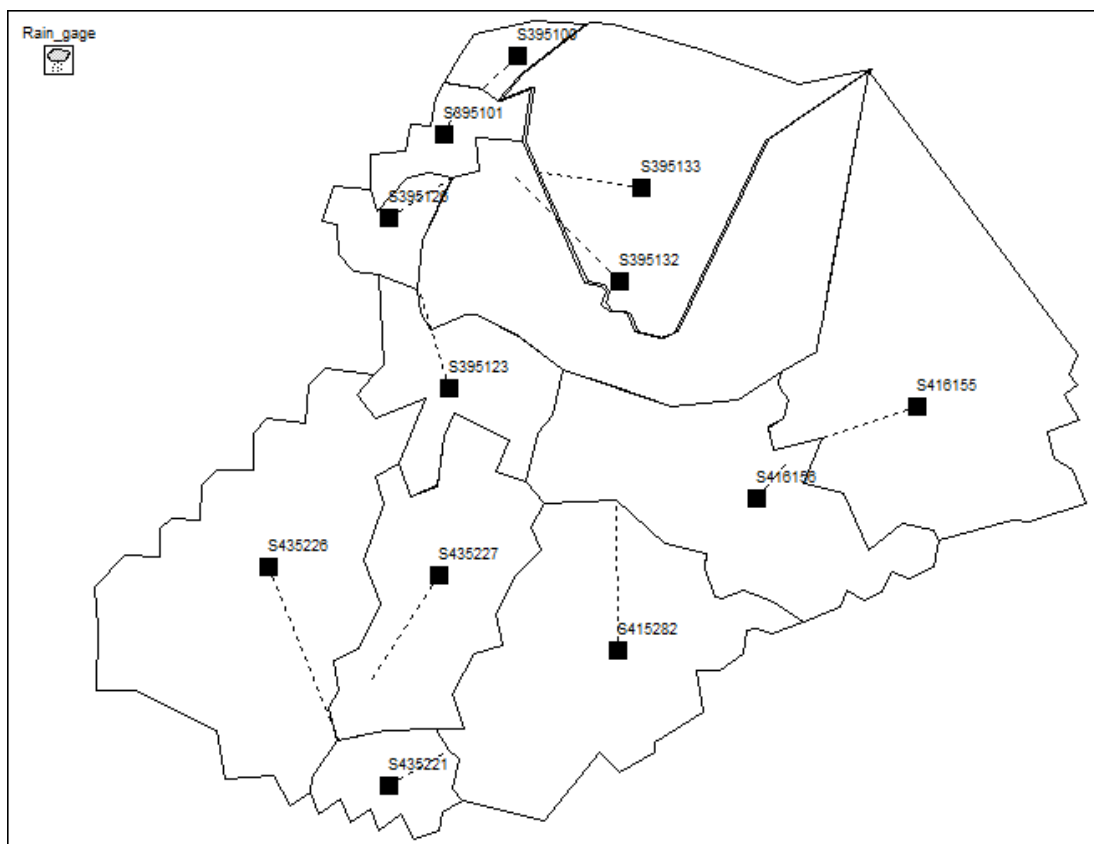
Στην παράγραφο 2.1.2 της εργασίας, αναλύθηκε λεπτομερώς η μεθοδολογία εκτίμησης της παροχής των ακαθάρτων. Αρχικά, για την εκτίμηση της παροχής χρειάζεται ο προσδιορισμός του πληθυσμού κάθε λεκάνης απορροής, ο οποίος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των στοιχείων της ΕΛΣΤΑΤ από την απογραφή πληθυσμού το έτος 2011. Όλες οι λεκάνες ανήκουν στο δήμο Αθηναίων. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ από την απογραφή του 2011 τα αποτελέσματα που προέκυψαν αφορούσαν πυκνότητα μόνιμου πληθυσμού ίση με 17042.55 κατοίκους/km<sup>2</sup>.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και έχοντας υπολογίσει την έκταση κάθε λεκάνης έγινε ο προσδιορισμός του πληθυσμού για κάθε λεκάνη απορροής και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παροχές αποχέτευσης ακαθάρτων. Αναλυτική παρουσίαση των υπολογισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.1 του παραρτήματος. Τέλος, η παροχή των ακαθάρτων εισήχθη στο μοντέλο στους κόμβους του δικτύου μέσω της επιλογής Inflows ⇒ Dry Weather. Οι λεκάνες απορροής με την

ονομασία τους απεικονίζονται στο Σχήμα 4.11, ενώ η μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων για κάθε λεκάνη απορροής που εισήχθη στο μοντέλο παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων κάθε λεκάνης

Λεκάνες	QAhmax(L/s)
S395100	-
S395101	3.4
S395126	3.3
S395133	-
S395132	9.1
S395123	6.4
S416155	11.1
S416156	11.8
S435227	9.6
S415282	13.6
S435221	4.0
S435226	14.8



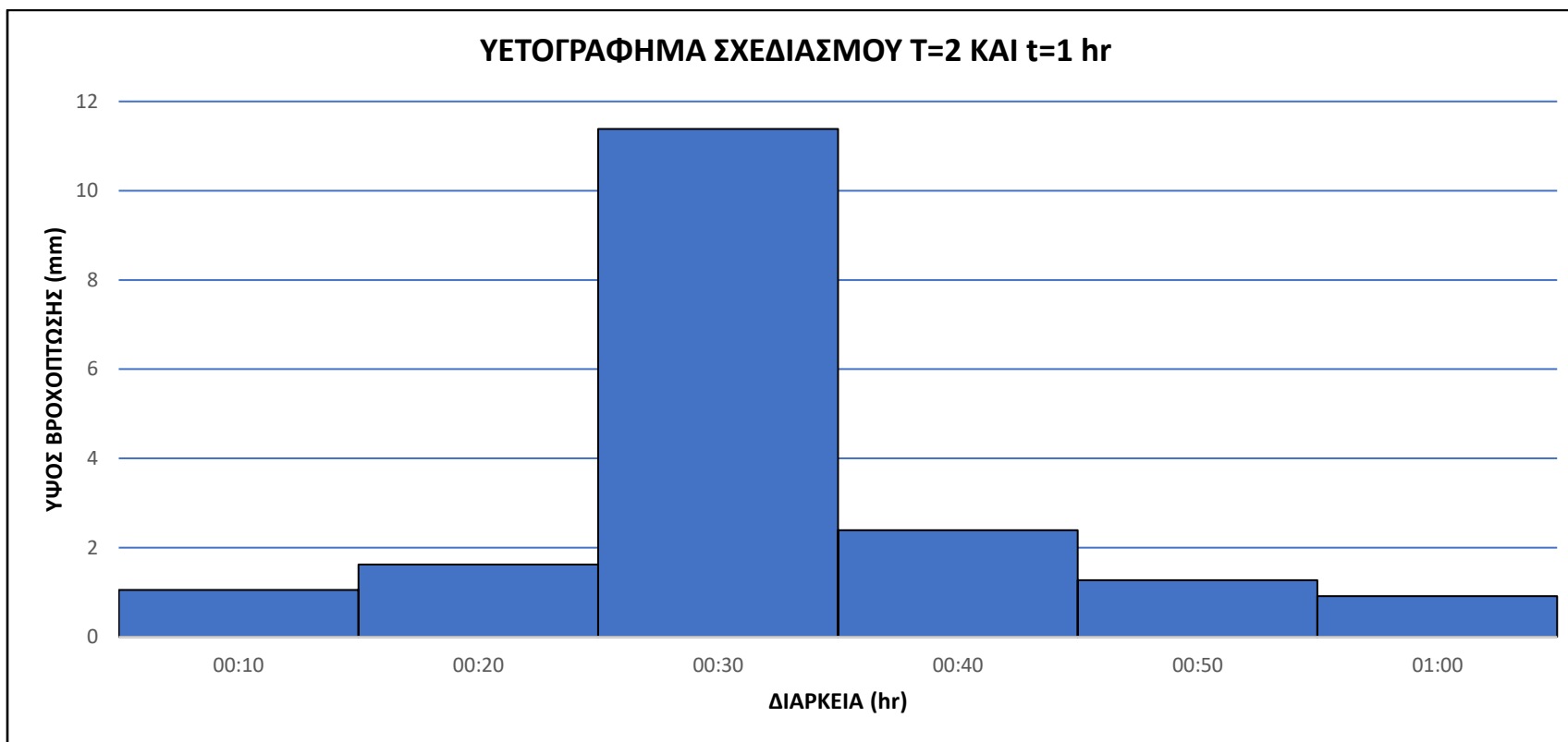
Σχήμα 4.11: Ονομασίες λεκανών απορροής της περιοχής μελέτης

#### 4.10 Δημιουργία Υετογραφημάτων

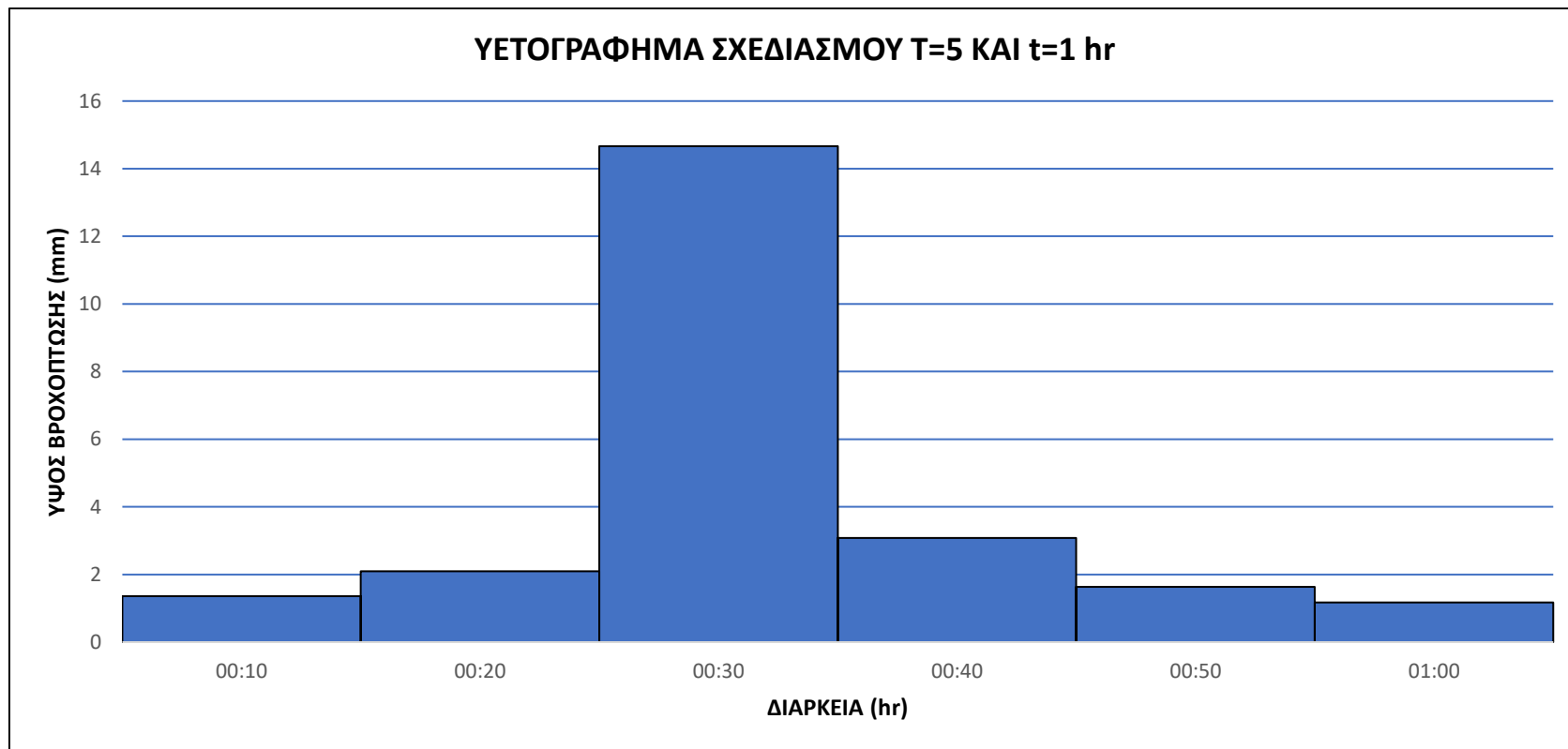
Για την εισαγωγή χρονοσειρών στο SWMM ήταν απαραίτητη η δημιουργία υετογραφημάτων. Τα υετογραφήματα αυτά δημιουργήθηκαν με τη χρήση της όμβριας καμπύλης για την περιοχή των Αθηνών των Μιμίκου et al. (2000):

$$i = 15.39 \times T^{0.276} \times d^{-0.725}$$

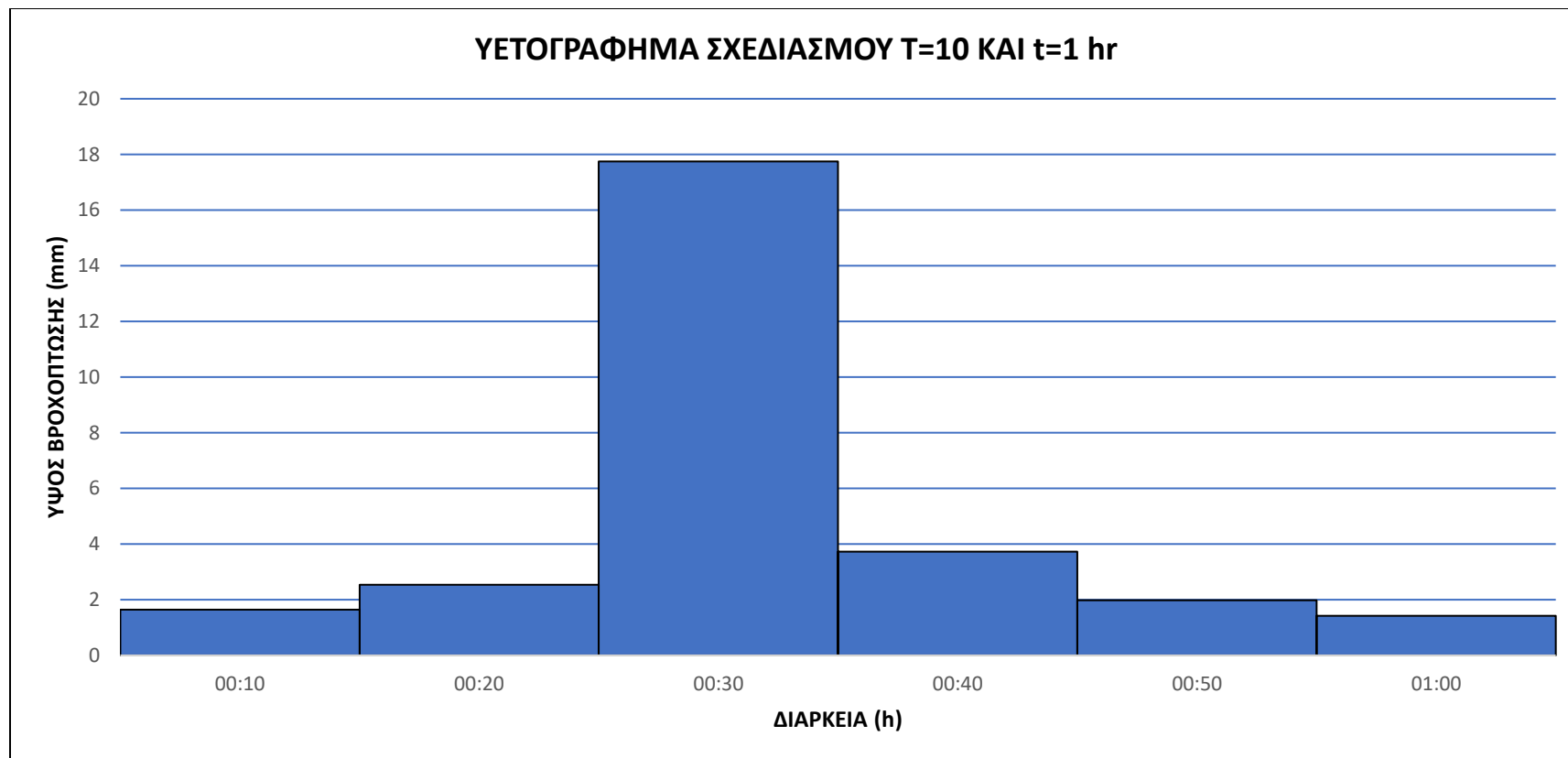
Με βάση λοιπόν τη συγκεκριμένη όμβρια καμπύλη, υπολογίστηκαν οι βροχοπτώσεις για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25 και 50 και διάρκειες βροχόπτωσης 1, 2, 6 και 12 ωρών. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα ύψη βροχής και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα υετογραφήματα με χρονικό βήμα 10 min. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την δημιουργία των υετογραφημάτων είναι η μέθοδος των Εναλλασσόμενων Υψών Βροχής (Alternative Block Method). Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκαν συνολικά 20 υετογραφήματα σχεδιασμού (4 για κάθε περίοδο επαναφοράς). Στα Σχήματα 4.12 έως 4.16 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα υετογραφήματα σχεδιασμού για χρονική διάρκεια βροχόπτωσης  $t=1$  ώρας και περίοδο επαναφοράς  $T=2, 5, 10, 25$  και 50 έτη, αντίστοιχα, ενώ τα υπόλοιπα υετογραφήματα σχεδιασμού παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.



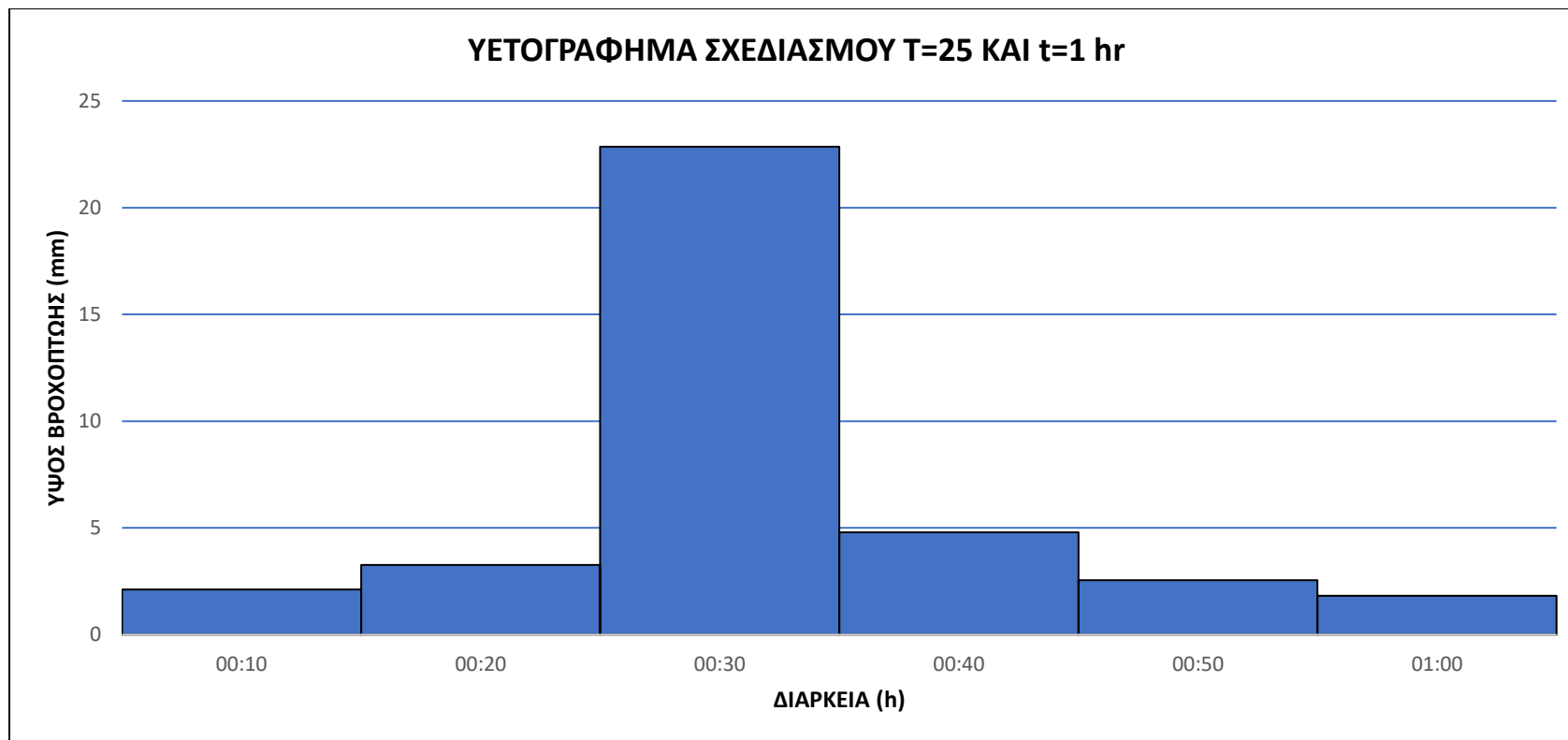
Σχήμα 4.12: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=1 h



Σχήμα 4.13: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=1 h

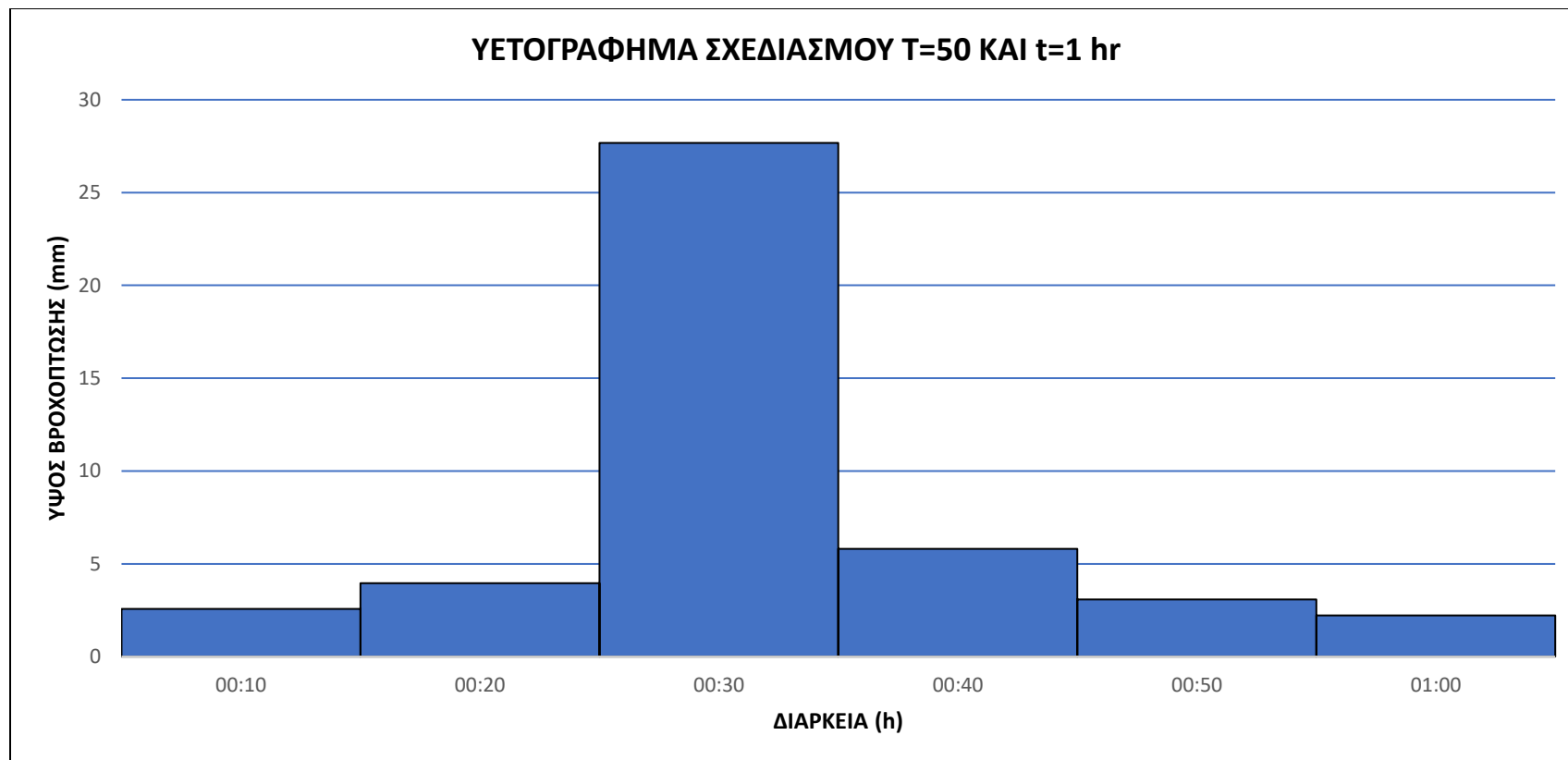


Σχήμα 4.14: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=1 h



Σχήμα 4.15: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=1 h





Σχήμα 4.16: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=1 h

#### 4.11 Βαθμονόμηση

Έχοντας ως δεδομένο σε δυο αγωγούς του μοντέλου μας, στον αγωγό 1313 και τον 1640, καταγεγραμμένα υδρογραφήματα, χρησιμοποιήσαμε αυτά τα καταγεγραμμένα ύψη, ώστε να βαθμονομήσουμε το μοντέλο μας. Ο στόχος της βαθμονόμησης ήταν το προσομοιωμένο υδρογράφημα να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα τον όγκο απορροής, την αιχμή, το χρόνο της αιχμής, καθώς και τους κλάδους ανόδου και καθόδου με το παρατηρηθέν υδρογράφημα. Για να γίνει αυτό ορίστηκε μια objective function και έτσι επιλέχθηκε ο συντελεστής απόδοσης Nash-Sutcliffe, ο οποίος έχει περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Στόχος του NSE ήταν να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο στη 1. Η επιλογή των παραμέτρων του SWMM για τη βαθμονόμηση εξαρτάται από τους στόχους της μελέτης και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες παράμετροι (Tsihrintzis et al. 1998). Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση τις παραμέτρους: το πλάτος των λεκανών, τον συντελεστή Manning των αγωγών, το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας, το συντελεστή Manning σε περατή και αδιαπέρατη επιφάνεια και την επιφανειακή αποθήκευση σε περατά και αδιαπέρατα εδάφη (Bellos et al. 2017, Koutris et al. 2017). Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται οι βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων. Οι τιμές των παραμέτρων προέκυψαν μετά την χειροκίνητη βαθμονόμηση η οποία πραγματοποιήθηκε. Πιο αναλυτικά στις παραμέτρους που επιλέχθηκαν για τη βαθμονόμηση, δόθηκαν κάποιες αρχικές τιμές, οι οποίες είτε είχαν υπολογιστεί σε προηγούμενα στάδια ανάλυσης στο ArcGIS, είτε επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία (Tsihrintzis 1999, Tsihrintzis et al. 1998). Στη συνέχεια, κάθε φορά που τροποποιούνταν αυτές οι τιμές, μέσα στα επιτρεπόμενα για κάθε παράμετρο όρια, γινόταν μια προσομοίωση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα που ήταν οι παροχές σε κάθε αγωγό εισέρχονταν στην συνάρτηση του συντελεστή απόδοσης. Η διαδικασία αυτή συνεχίστηκε μέχρις ότου επιτευχθεί τιμή πιο κοντά στο 1. Τα αποτελέσματα του συντελεστή NSE αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

Πίνακας 4.2: Βαθμονομημένες τιμές παραμέτρων SWMM

Parameter	Calibration											
	Subcatchment											
	S395100	S395101	S395126	S395133	S395132	S395123	S416155	S416156	S435227	S415282	S435221	S435226
Width (m)	59	120	85	174	250	156	160	99	148	223	79	283
Impervious area (%)	40	90	90	20	20	90	22	38	90	38	90	85
Manning coefficient of the impervious area ( $s/m^{1/3}$ )	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Manning coefficient of the pervious area ( $s/m^{1/3}$ )	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Depression storage on impervious area (mm)	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54
Depression storage on pervious area (mm)	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51
Manning coefficient of the sewer system ( $s/m^{1/3}$ )	-	0.013	0.014	-	0.014	0.014-0.015	-	0.014	0.017-0.018	0.014-0.018	0.017	0.014

Τα αποτελέσματα επίσης της βαθμονόμησης, αξιολογήθηκαν παραπέρα με τη χρήση κάποιων κριτηρίων αποδοτικότητας. Αυτά ήταν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE, το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE, ο συντελεστής προσδιορισμού  $r^2$ , ο δείκτης συμφωνίας d, και η κανονικοποιημένη αντικειμενική συνάρτηση NOF (Krause et al. 2005, Muleta et al. 2012)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |S_i - O_i|$$

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

$$NOF = \frac{RMSE}{\bar{O}}$$

όπου:

$O_i$  = παρατηρημένη απορροή στο χρόνο i

$S_i$  = προσομοιωμένη απορροή στο χρόνο i

$\bar{O}$  = μέσος όρος των παρατηρήσεων

$\bar{S}$  = μέσος όρος των προσομοιώσεων

n = αριθμός παρατηρήσεων

#### 4.12 Καθορισμός των παραμέτρων LIDs και των σεναρίων

Εφόσον στο Κεφάλαιο 2 έγινε εκτενής ανάλυση των τριών LID, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν, ακολούθησε η εισαγωγή των παραμέτρων τους στο λογισμικό. Το μενού της παραμετροποίησης φαίνεται παρακάτω (Σχήματα 4.17, 4.18, 4.19) για τις πράσινες οροφές, τα περατά οδοστρώματα και την αποσύνδεση οροφής, αντίστοιχα.

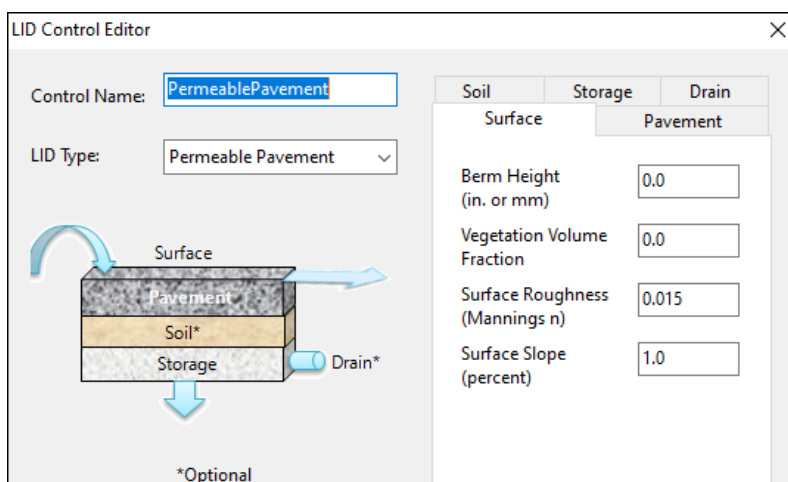
The screenshot shows the 'LID Control Editor' window. The 'Control Name' is 'GreenRoof' and the 'LID Type' is 'Green Roof'. The 'Surface' tab is selected, displaying the following parameters:

Parameter	Value
Berm Height (in. or mm)	100
Vegetation Volume Fraction	0.2
Surface Roughness (Mannings n)	0.25
Surface Slope (percent)	1.0

A diagram on the left illustrates the LID structure with three layers: 'Surface' (top, green), 'Soil' (middle, yellow), and 'Drainage Mat' (bottom, grey). Arrows indicate water flow: entering the surface, moving through the soil, and exiting through the drainage mat.

Σχήμα 4.17: Εισαγωγή παραμέτρων στο SWMM για τις πράσινες οροφές

Βλέπουμε λοιπόν ότι υπάρχει μια σχηματική αναπαράσταση η οποία κάνει ευκολότερα κατανοητό τον τρόπο που λειτουργεί κάθε μέτρο, καθώς και ότι κάθε μέτρο έχει διαφορετικές κατηγορίες παραμέτρων. Αλλά και ότι και για τις ίδιες κατηγορίες παραμέτρων οι τιμές μπορεί να είναι τελείως διαφορετικές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, στην κατηγορία των παραμέτρων της επιφάνειας (Surface) ενός LID, το πεδίο Berm Height. Το συγκεκριμένο πεδίο αναφέρεται στο μέγιστο βάθος, στο οποίο μπορεί να τοποθετηθεί νερό πάνω από την επιφάνεια της μονάδας ενός LID, προτού το νερό υπερχειλίζει. Η τιμή που εισήχθη λοιπόν, για τις πράσινες στέγες, ήταν 100 mm, ενώ από την άλλη για τα περατά πεζοδρόμια 0.



Σχήμα 4.18: Εισαγωγή παραμέτρων στο SWMM για περατά πεζοδρόμια

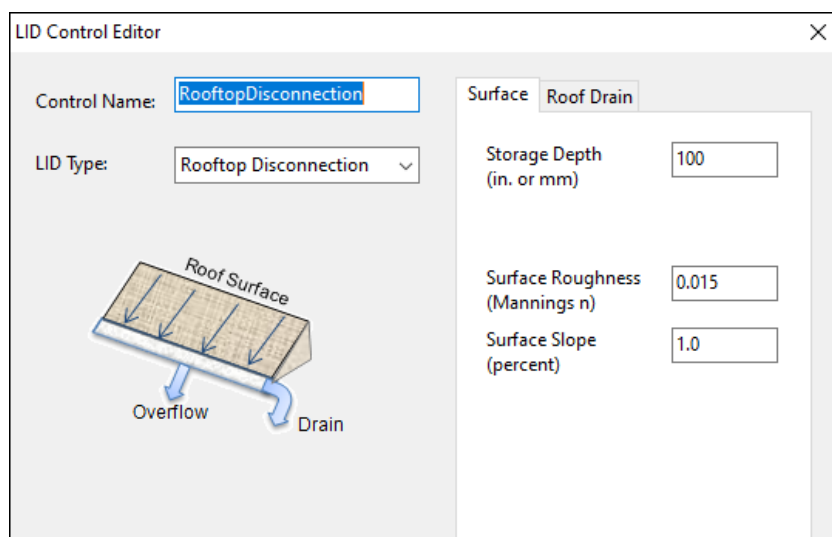
Οι τιμές αυτές αλλάζουν όχι μόνο από τη μια μέθοδο στην άλλη, αλλά ακόμα και για το ίδιο μέτρο ανάλογα με την περιοχή μελέτης, την υπόθεση που έχει κάνει ο μελετητής και ούτω καθεξής. Η παραμετροποίηση εδώ εν προκειμένω βασίστηκε πάνω σε μελέτες, όπως των Koutris et al. (2018) και Chui et al. (2016), ενώ η τιμή της παραμέτρου Flow capacity (μέγιστος ρυθμός ροής που μπορεί να «εξυπηρετήσει» η υδρορροή της οροφής προτού υπερχειλίσει) για το μέτρο Rooftop Disconnection υπολογίστηκε από την ακόλουθη εξίσωση:

$$q_{max} = 0.52 * w_g^{2.5} / A_r$$

όπου:

$W_g$  το πλάτος της υδρορροής (feet)

$A_r$  το εμβαδό της οροφής που εξυπηρετούνται από την υδρορροή (square feet)



Σχήμα 4.19: Εισαγωγή παραμέτρων στο SWMM για αποσύνδεση οροφής

Στους Πίνακες 4.3, 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται κάποια τυπικά εύρη τιμών των παραμέτρων των 3 μέτρων Green Roofs, Permeable Pavements και Rooftop Disconnection αντίστοιχα, όπως δίνονται από τον Rossman (2016).

Πίνακας 4.3: Τυπικό εύρος τιμών παραμέτρων για Green Roofs  
Πηγή: Rossman (2016)

Parameter	Range
Maximum Freeboard, inches ( $D_1$ )	0 – 3
Surface Void Fraction ( $\phi_1$ )	0.8 – 1.0
Soil Layer Thickness, inches ( $D_2$ )	2 – 6
Soil Parameters:	
Porosity ( $\phi_2$ )	0.45 – 0.6
Field Capacity ( $\theta_{FC}$ )	0.3 – 0.5
Wilting Point ( $\theta_{WP}$ )	0.05 – 0.2
Plant Available Water ( $\theta_{FC} - \theta_{WP}$ )	0.25 – 0.3
Saturated Hydraulic Conductivity, in/hr ( $K_{2s}$ )	40 – 140
Wetting Front Suction Head, inches ( $\psi_2$ )	2 – 4
Percolation Parameter ( $HCO$ )	30 – 55
Drainage Layer Thickness, inches ( $D_3$ )	0.5 – 2
Drainage Layer Void Fraction ( $\phi_3$ )	0.2 – 0.4
Drainage Layer Roughness ( $n_3$ )	0.01 – 0.03
Capture Ratio ( $R_{LID}$ )	0

Πίνακας 4.4: Τυπικό εύρος τιμών παραμέτρων για Permeable Pavements  
Πηγή: Rossman (2016)

Parameter	Range
Surface Depression Storage, inches ( $D_1$ )	0 – 0.1
Surface Void Fraction ( $\phi_1$ )	1.0
Pavement Thickness, inches ( $D_4$ )	3 – 8
Continuous Pavement:	
Porosity ( $\phi_4$ )	0.15 – 0.25
Permeability, in/hr ( $K_4$ )	28 – 1750
Surface Opening Fraction ( $1 - F_4$ )	0
Block Pavers:	
Porosity ( $\phi_4$ )	0.1 – 0.4
Permeability, in/hr ( $K_4$ )	5 – 150
Surface Opening Fraction ( $1 - F_4$ )	0.08 – 0.10
Sand Filter Layer:	
Thickness, inches ( $D_2$ )	8 – 12
Porosity ( $\phi_2$ )	0.25 – 0.35
Field Capacity ( $\theta_{FC}$ )	0.15 – 0.25
Wilting Point ( $\theta_{WP}$ )	0.05 – 0.10
Saturated Hydraulic Conductivity, in/hr ( $K_{2s}$ )	5 – 30
Wetting Front Suction Head, inches ( $\psi_2$ )	2 – 4
Percolation Parameter ( $HCO$ )	30 – 55
Storage Layer Thickness, inches ( $D_3$ )	6 – 36
Storage Void Fraction ( $\phi_3$ )	0.2 – 0.4
Capture Ratio ( $R_{LID}$ )	0 – 5

Πίνακας 4.5: Τυπικό εύρος τιμών παραμέτρων για Rooftop Disconnection  
Πηγή: Rossman (2016)

Parameter	Range
Berm height-Storage depth (inches)	0.05-0.1
Surface roughness (Manning's n)	0.013-0.015
Flow capacity (mm/hr)	Variable

Τέλος, στον Πίνακα 4.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι της συγκεκριμένης εργασίας, που εισήχθησαν στο λογισμικό για κάθε μέτρο LID, ενώ παράλληλα θα εξηγηθεί η σημασία κάθε παραμέτρου που χρησιμοποιήθηκε.

Στο layer λοιπόν της επιφάνειας (surface), εκτός από το berm height, υπάρχουν ακόμα οι παράμετροι vegetation volume fraction, surface roughness και surface slope. Η πρώτη είναι το κλάσμα του όγκου βλάστησης, δηλαδή το επιφανειακό βάθος αποθήκευσης, που είναι καλυμμένο με βλάστηση. Η δεύτερη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας που εκφράζεται από τον συντελεστή Manning για χερσαία ροή στην επιφάνειας μιας οροφής ή ενός οδοστρώματος και τέλος είναι η κλίση της επιφάνειας της οροφής ή του οδοστρώματος.

Στο layer του εδάφους (soil) υπάρχουν οι παράμετροι thickness, porosity, field capacity, wilting point, conductivity, conductivity slope και suction head. Η παράμετρος thickness αναφέρεται στο πάχος του στρώματος του εδάφους, ενώ η δεύτερη είναι το πορώδες του εδάφους. Το field capacity είναι η χωρητικότητα του πεδίου, το wilting point είναι το σημείο μααρασμού, ενώ οι υπόλοιπες κατά σειρά είναι η υδραυλική αγωγιμότητα για το πλήρως κορεσμένο χώμα, η κλίση της αγωγιμότητας και τέλος η μέση τιμή της αναρρόφησης τριχοειδούς εδάφους κατά μήκος του βρεχόμενου μέσου.

Στο layer του οδοστρώματος (pavement) υπάρχουν οι παράμετροι thickness, void ratio, impervious surface fraction, permeability και clogging factor. Κατά σειρά εκφράζουν, η πρώτη το πάχος του οδοστρώματος, η δεύτερη τον όγκο του κενού χώρου σε σχέση με τον όγκο των στερεών στο πεζοδρόμιο, η τρίτη τον λόγο του αδιαπέρατου υλικού προς την συνολική επιφάνεια, η τέταρτη την διαπερατότητα του σκυροδέματος ή της ασφάλτου και η τελευταία τον συντελεστή φραγής του οδοστρώματος.

Στο layer του στρώματος αποστράγγισης (drainage mat) υπάρχουν οι παράμετροι thickness, που είναι το πάχος του στρώματος, void fraction, που εκφράζει τον λόγο του κενού όγκου προς το



συνολικό όγκο στο στρώμα και roughness, που αντιστοιχεί στην τραχύτητα εκφρασμένη με τον συντελεστή Manning.

Στο layer της αποθήκευσης (storage) υπάρχει το πάχος του στρώματος του χαλικιού (thickness), ο λόγος του όγκου του κενού προς τον όγκο των στερεών (void ratio), ο ρυθμός διήθησης (seepage rate) και ο παράγοντας φραγής του υλικού (clogging factor).

Τέλος στο layer της αποστράγγισης (drain) εκφράζεται η απόσταση του ύψους της γραμμής αποστράγγισης πάνω από το κάτω μέρος του στρώματος αποθήκευσης (offset height) και ο συντελεστής και εκθέτης ροής (flow coefficient και flow exponent) που εκφράζουν το ρυθμό ροής μέσω μιας αποχέτευσης, ως συνάρτηση του ύψους του αποθηκευμένου νερού πάνω από την εκτροπή της αποχέτευσης

Πίνακας 4.6: Παράμετροι πρακτικών LID

Layer	Parameter	Green Roofs	Permeable Pavements	Rooftop Disconnection
Surface	Berm height-Storage depth (mm)	100	0	100
	Vegetation volume fraction	0.2	0	-
	Surface roughness (Manning's n)	0.25	0.015	0.015
	Surface slope (%)	1	1	1
Soil	Thickness (mm)	200	0	-
	Porosity (volume fraction)	0.5	0.5	-
	Field capacity (volume fraction)	0.4	0.2	-
	Wilting point (volume fraction)	0.1	0.1	-
	Conductivity (mm/hr)	1000	0.5	-
	Conductivity slope	10	10	-
	Suction head (mm)	50	3.5	-
Pavement	Thickness (mm)	-	150	-
	Void ratio (Voids/Solids)	-	0.15	-
	Impervious Surface fraction	-	0	-
	Permeability (mm/hr)	-	500	-
	Clogging factor	-	0	-
Drainage Mat	Thickness (mm)	100	-	-
	Void fraction	0.3	-	-
	Roughness (Manning's n)	0.015	-	-
Storage	Thickness (mm)	-	400	-
	Void ratio (Voids/Solids)	-	0.3	-
	Seepage rate (mm/hr)	-	750	-
	Clogging factor	-	0	-
Drain	Flow coefficient	-	0.5	-
	Flow exponent	-	0.5	-
	Offset (mm)	-	100	-
	Flow capacity (mm/hr)	-	-	121.7

Αφού λοιπόν πραγματοποιήθηκε ο ορισμός των παραμέτρων για τις 3 πρακτικές δημιουργήθηκαν 7 σενάρια. Τα σενάρια ήταν:

1. Σενάριο 1 - Green Roofs
2. Σενάριο 2 - Permeable Pavements
3. Σενάριο 3 - Rooftop Disconnection
4. Σενάριο 4 - Green Roofs + Permeable Pavements
5. Σενάριο 5 - Green Roofs + Rooftop Disconnection
6. Σενάριο 6 - Permeable Pavements + Rooftop Disconnection
7. Σενάριο 7 - Green Roofs + Permeable Pavements + Rooftop Disconnection

Αυτό που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι για κάθε LID ξεχωριστά σε κάθε υπολεκάνη, ακολουθήθηκε μια αρχή. Η αρχή αυτή ήταν ότι η εφαρμογή κάθε μέτρου, δεν θα έπρεπε να ξεπερνά το 70-80% της διαθέσιμης επιφάνειας. Ο λόγος εφαρμογής αυτής της αρχής ήταν ότι η χρήση του 100% της διαθέσιμης επιφάνειας για την τοποθέτηση ενός LID αύξανε πάρα πολύ το κόστος καθιστώντας την πρακτική απαγορευτική.



## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

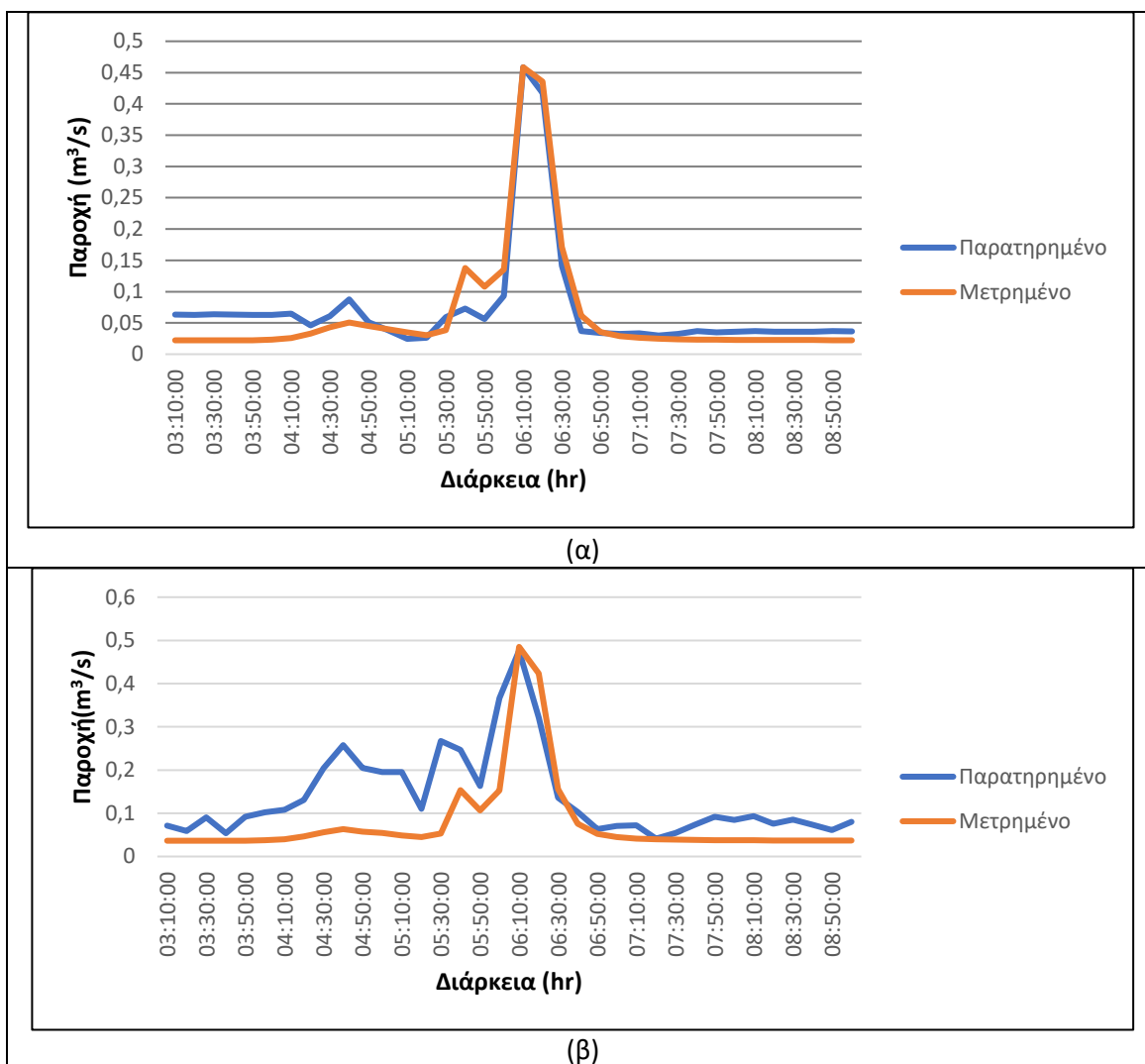
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των αγωγών 1313 και 1640 του υπό μελέτη παντοροϊκού δικτύου. Επιπλέον παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών για την ζώνη Z2 για βροχοπτώσεις περιόδου επαναφοράς 2,5,10,25 και 50 ετών και για διάρκειες 1, 2, 6 και 12 ωρών. Στη συνέχεια επιλέχθηκε η βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας 1 και 12 ωρών και έγινε χρήση 7 διαφορετικών σεναρίων εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης της όμβριας απορροής. Σκοπός ήταν να μελετηθεί αν και πόσο οι μέθοδοι αυτές μειώνουν την απορροή. Τέλος παρουσιάζονται τα οικονομικά στοιχεία της μελέτης, όπως το κόστος κεφαλαίου των σεναρίων, το κόστος κύκλου ζωής κάθε σεναρίου, τα οικονομικά οφέλη κτλ.

Ξεκινώντας έχοντας αναλύσει τη σημασία και τον τρόπο λειτουργίας του συντελεστή απόδοσης Nash-Sutcliffe προχωρήσαμε στη βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιώντας το συντελεστή NSE στους αγωγούς 1313 και 1640. Οι τιμές του συντελεστή απόδοσης ήταν 0.913 για τον 1313 και 0.724 για τον 1640.

Οι τιμές και για τους δυο αγωγούς κρίθηκαν ικανοποιητικές, με βάση και προηγούμενες βαθμονομήσεις σε αυτούς τους αγωγούς (Kourtis et al. 2017) και παρόλο που έγιναν περαιτέρω δοκιμές δεν επετεύχθη κάποιο καλύτερο αποτέλεσμα. Να τονιστεί ότι όλες οι δοκιμές ήταν χειροκίνητες. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα παρατηρημένα και τα μετρημένα υδρογραφήματα για τους αγωγούς 1313 και 1640. Ακόμα τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν περαιτέρω, χρησιμοποιώντας πρόσθετα κριτήρια αποδοτικότητας, όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE, το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE, τον συντελεστή προσδιορισμού  $r^2$ , το δείκτη συμφωνίας  $d$ , και την κανονικοποιημένη αντικειμενική συνάρτηση NOF και κρίθηκαν ικανοποιητικά (Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα κριτηρίων απόδοσης

Αγωγοί	RMSE	MAE	$r^2$	$d$	NOF
1640	0.0890	0.0680	0.6064	0.7316	0.6437
1313	0.0270	0.0215	0.9343	0.9291	0.3739



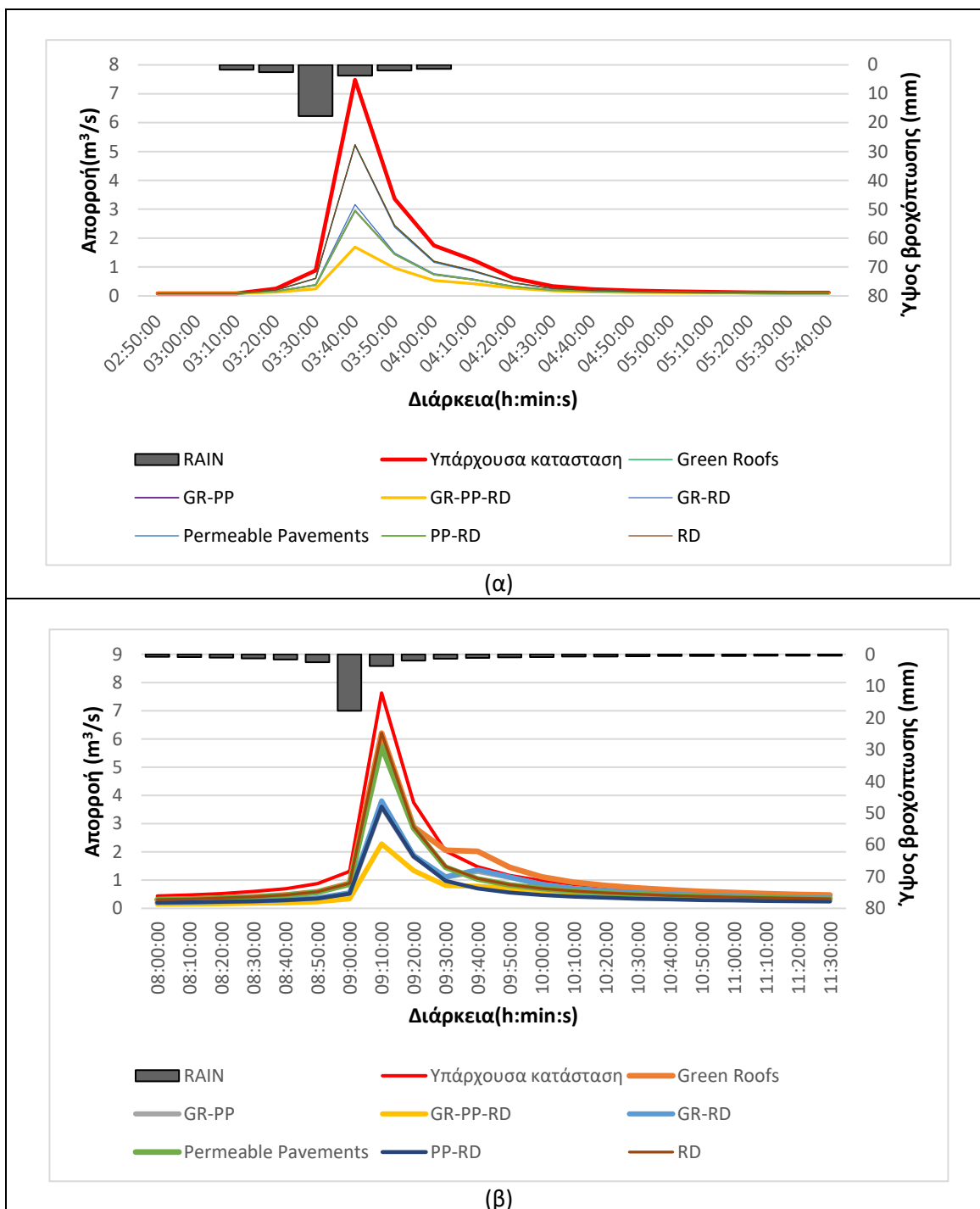
Σχήμα 5.1: Βαθμονόμηση μοντέλου στους αγωγούς 1313(α) και 1640(β)

Έπειτα με τη χρήση των εναλλασσόμενων μπλοκ δημιουργήθηκαν 20 συνθετικές χροχοπτώσεις για τις οποίες προσομοιώθηκε το υπό μελέτη σύστημα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι το σύστημα για κάθε προσομοίωση αστοχούσε, δηλαδή υπήρχαν φρεάτια που πλημμύριζαν και αγωγοί που δεν πληρούσαν τα όρια που τίθενται από το ΠΔ-696/74 (ταχύτητα  $<6$  m/s και λόγος πλήρωσης  $\gamma/D < 0.8$ ). Πιο αναλυτικά υπήρχαν φρεάτια που πλημμύριζαν και όσο αύξανε η ένταση και η περίοδος επαναφοράς αυτά γινόντουσαν περισσότερα (Πίνακας 5.2), ενώ σε επίπεδο αγωγών η κατάσταση ήταν δυσμενέστερη (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων υπάρχουσας κατάστασης

Συνθετικές βροχοπτώσεις	Πλήθος φρεατίων που πλημμυρίζουν	Πλήθος αγωγών όπου ταχύτητα > 6 m/s	Πλήθος αγωγών όπου $y/D > 0.8$
T2d1	3	20	10
T2d2	3	20	10
T2d6	3	20	10
T2d12	3	20	10
T5d1	3	21	11
T5d2	3	21	11
T5d6	3	21	11
T5d12	3	21	12
T10d1	3	21	12
T10d2	3	21	14
T10d6	3	21	15
T10d12	3	21	16
T25d1	4	23	19
T25d2	4	23	21
T25d6	4	23	21
T25d12	4	24	21
T50d1	6	24	28
T50d2	6	26	29
T50d6	8	26	30
T50d12	9	26	30

Στη συνέχεια εφόσον παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο αστοχούσε, διαστασιολογήθηκαν τα LIDs για την αποχέτευση απορροής για βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς μέχρι 10 έτη. Στόχος ήταν η μείωση της απορροής. Πράγματι όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.2α και 5.2β, η μείωση της αιχμής επετεύχθη σε κάθε σενάριο και το σενάριο 7 (βλ. Κεφάλαιο 4) της συνδυαστικής χρήσης των 3 πρακτικών πέτυχε τη μεγαλύτερη μείωση, η οποία φτάνει το 77% για τη διάρκεια της μιας ώρας και το 70% (Πίνακας 5.3) για τη διάρκεια των 12 ωρών. Αντίστοιχα η μικρότερη μείωση προήλθε για χρήση των Green Roofs και Rooftop Disconnection με 30% και 18.7% για τις δυο διάρκειες.



Σχήμα 5.2: Υδρογράφημα μιας ώρας (α) και δώδεκα ωρών (β) και περιόδου επαναφοράς 10 χρόνων για τον αγωγό 1621



Πίνακας 5.3 :Ποσοστιαία μείωση της απορροής

LIDs	% Μείωση Αιχμής Απορροής T10d1	% Μείωση Αιχμής Απορροής T10d12
Green Roofs	30.0	18.7
GR-PP	60.6	52.8
GR-PP-RD	77.4	70.1
GR-RD	57.7	50.1
Permeable Pavements	30.2	24.8
PP-RD	60.6	52.8
RD	30.0	18.7

Τέλος, υπολογίστηκε το κόστος της εφαρμογής των μέτρων αυτών. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 υπολογίστηκε το κόστος κεφαλαίου (capital cost) κάθε σεναρίου (Πίνακας 5.4). Με βάση λοιπόν τα στοιχεία που ακολουθούν παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο κόστος κεφαλαίου έχει το σενάριο 4 με 20 εκατομμύρια € (GR-PP) και ακολουθεί το σενάριο 7 (GR-PP-RD) με 17 εκατομμύρια €. Το παράδοξο εδώ, δηλαδή το σενάριο 4 που αποτελείται μόνο από 2 μέτρα LID να είναι πιο κοστοβόρο από το σενάριο 7 που αποτελείται από 3 εξηγείται, γιατί μειώνεται το πλήθος των πράσινων οροφών που είναι το πλέον δαπανηρό μέτρο (αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στον περιορισμό που τίθεται από το SWMM, τα μέτρα LID να μην ξεπερνούν το 100% της διαθέσιμης επιφάνειας).

Πίνακας 5.4: Κόστος κεφαλαίου σεναρίων

Σενάρια	Σύνολο Έργου (€)
GR	13,546,232
PP	6,512,219
RD	177,905
GR-PP	20,058,451
GR-RD	13,686,113
PP-RD	6690124
GR-PP-RD	17,280,648

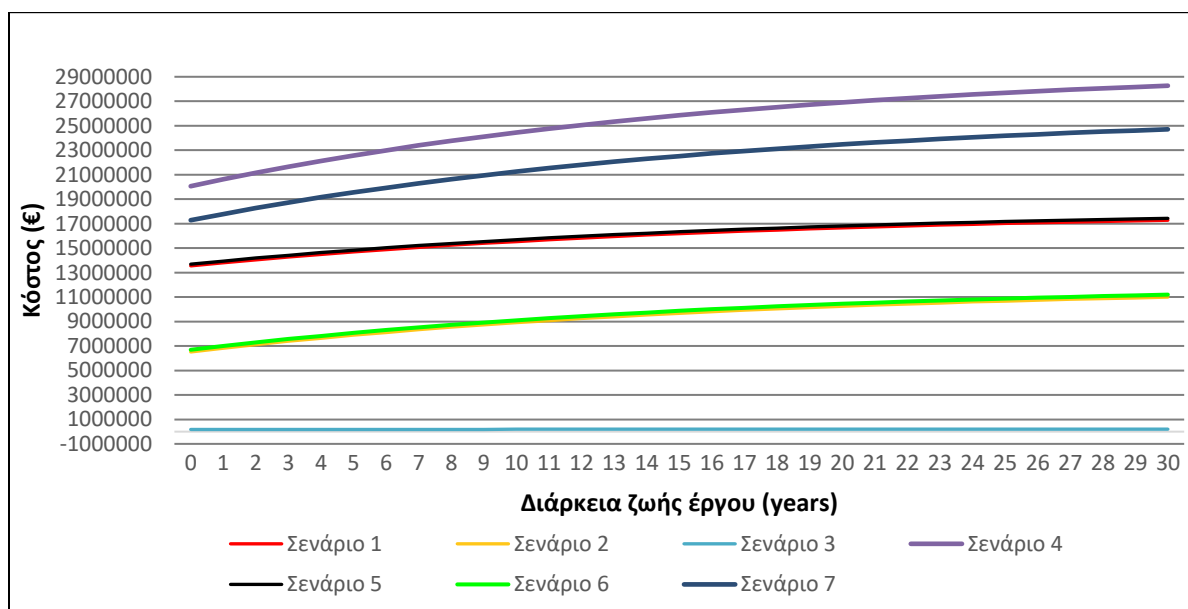
Έπειτα υπολογίστηκε το κόστος κύκλου ζωής κάθε σεναρίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος οικονομικής σύγκρισης εναλλακτικών επενδύσεων (εδώ σεναρίων), βασίζεται στο συνολικό κόστος στη διάρκεια ζωής ενός έργου. Έτσι λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο το αρχικό κόστος της

επένδυσης (κόστος κεφαλαίου), αλλά και τα μελλοντικά κόστη, όπως κόστος ενέργειας, λειτουργίας, συντήρησης, αντικατάστασης εξοπλισμού κτλ. Αυτά είναι τα λεγόμενα Operation & Maintenance Costs (O&M) που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Το κόστος κύκλου ζωής (Life Cycle Cost) λοιπόν των σεναρίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5, ενώ ακολουθεί και η εξέλιξη του κόστους κύκλου ζωής στη διάρκεια ζωής του έργου (Σχήμα 5.4).

Πίνακας 5.5: Κόστος κύκλου ζωής σεναρίων ανά έτος

ΣΕΝΑΡΙΑ	LCC (€)
GR	17,275,464
PP	10,994,199
RD	202,393
GR-PP	28,269,663
GR-RD	17,429,434
PP-RD	11,196,592
GR-PP-RD	24,707,933

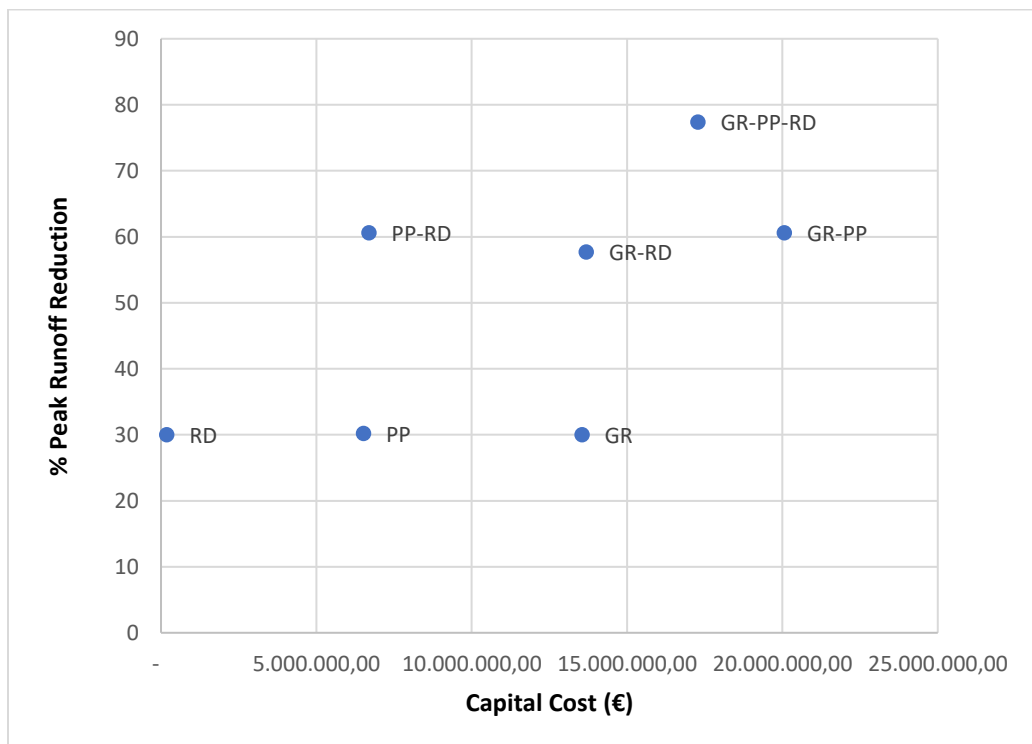
Το μεγαλύτερο LCC παρουσιάζει το σενάριο 4 περίπου 28 εκατομμύρια €, ενώ ακολουθεί το σενάριο 7 με περίπου 25 εκατ. € (ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι ο ίδιος που επεξηγήθηκε για το κόστος κεφαλαίου). Από την άλλη το μικρότερο LCC εμφανίζει το σενάριο 3. Αντίστοιχη είναι και η εικόνα που παρουσιάζεται με την εξέλιξη του LCC στα 30 χρόνια στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Εξέλιξη κόστους κύκλου ζωής του έργου

Ακόμα υπολογίστηκε το κόστος κεφαλαίου έναντι του ποσοστού μείωσης της αιχμής απορροής για διάφορα σενάρια (Σχήμα 5.4). Λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα παρατηρούμε ότι το σενάριο

4, το οποίο όπως φάνηκε στον Πίνακα 5.4 ενώ έχει το μεγαλύτερο κόστος δεν παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της αιχμής της απορροής. Αυτό το πετυχαίνει το σενάριο 7 με 77% μείωση της αιχμής και κόστος 17 εκατομμύρια €.



Σχήμα 5.4: Κόστος κεφαλαίου έναντι ποσοστού μείωσης της αιχμής απορροής (T10d1)

Τέλος, παρουσιάζεται το παράγωγο όφελος (co-benefit) της εξοικονόμησης χρημάτων, το οποίο βασίζεται σε οφέλη όπως η εξοικονόμηση νερού, η εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της λιγότερης χρήσης της ψύξης, η βελτίωσης της ποιότητας του αέρα και η δέσμευσης του άνθρακα και άλλα οφέλη που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 (Alves et al. 2019). Για αυτό το λόγο το συγκεκριμένο όφελος μπορεί να αναφερθεί και ως περιβαλλοντικό όφελος. Οι τιμές λήφθηκαν βιβλιογραφικά (Alves et al. 2019) και είναι για τις πράσινες οροφές 2,91 €/m<sup>2</sup>/γ και για τα περατά οδοστρώματα 2,87 €/m<sup>2</sup>/γ. Στους Πίνακες 5.6 και 5.7 φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού για τα σενάρια 1 και 2.

Πίνακας 5.6: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση των πράσινων οροφών

FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/γ)
100	Green_Roof	1	76	221.2
101	Green_Roof	22	63	4007.6
126	Green_Roof	16	62	2877.4
133	Green_Roof	0	0	0
132	Green_Roof	105	76	23099.6
123	Green_Roof	70	63	12914.6
155	Green_Roof	133	87	33516.8
156	Green_Roof	162	82	38420.7
282	Green_Roof	191	83	46021.1
227	Green_Roof	130	77	29280.4
221	Green_Roof	34	71	7054.4
226	Green_Roof	207	74	44756.1
			<b>sum</b>	242169.9

Πίνακας 5.7: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση των περατών οδοστρωμάτων

FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/γ)
100	Permeable Pavement	1	278	797.9
101	Permeable Pavement	2	571	3277.5
126	Permeable Pavement	0	0	0
133	Permeable Pavement	0	0	0
132	Permeable Pavement	18	473	24435.2
123	Permeable Pavement	13	487	18170.0
155	Permeable Pavement	23	328	21651.3
156	Permeable Pavement	32	372	34164.5
282	Permeable Pavement	32	414	38021.8
227	Permeable Pavement	14	606	24349.1
221	Permeable Pavement	8	478	10974.9
226	Permeable Pavement	43	578	71331.0
			<b>sum</b>	247173.0

Τέλος στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται όλα τα ετήσια περιβαλλοντικά οφέλη των σεναρίων. Και πάλι τα σενάρια 4 και 7 είναι αυτά που ξεχωρίζουν. Το όφελος από το σενάριο 4 είναι μεγαλύτερο λόγω της χρήσης περισσότερων πράσινων οροφών και από την άλλη στο σενάριο 7 λόγω του μη υπολογισμού οφέλους για την αποσύνδεση οροφής.

Πίνακας 5.8: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος όλων των σεναρίων

ΣΕΝΑΡΙΑ	Περιβαλλοντικό όφελος (€/γ)
GR	242,170
PP	247,173
RD	-
GR-PP	489,343
GR-RD	241,455
PP-RD	247,173
GR-PP-RD	434,500



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση μέρους της Ζ2' ζώνης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών. Πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις λειτουργίας του αποχετευτικού συστήματος στο λογισμικό SWMM, η εφαρμογή αειφόρων μεθόδων μείωσης απορροής και η οικονομική ανάλυση αυτών. Το λογισμικό SWMM 5.1 αποτελεί ένα ιδιαίτερα εύχρηστο λογισμικό το οποίο μπορεί να μελετηθεί, κατανοηθεί και τελικά να χρησιμοποιηθεί από έναν μηχανικό λόγω της απλότητας της πλατφόρμας εργασίας καθώς και των πολλών εγχειριδίων χρήσης. Στοιχεία όπως η ταχύτητα εκτέλεσης των υπολογισμών, η ευκολία στην αναπαράσταση των υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών και η δυνατότητα σύνδεσης με το λογισμικό ArcGIS αποτελούν στοιχεία που το ξεχωρίζουν.

Τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- ArcGIS (ESRI)
- Autocad (Autodesk)
- Excel (Microsoft)
- InpPINs
- SWMM (EPA)

Προτού πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του παντορροϊκού δικτύου πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου σύμφωνα με μετρήσεις οι οποίες ήταν διαθέσιμες σε δυο αγωγούς. Οι παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση ήταν το πλάτος των λεκανών, ο συντελεστής Manning των αγωγών, το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας, ο συντελεστής Manning σε περατή και αδιαπέρατη επιφάνεια και η επιφανειακή αποθήκευση σε περατά και αδιαπέρατα εδάφη. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας κρίθηκαν ικανοποιητικά, σε σύγκριση και με προγενέστερη διαδικασία βαθμονόμησης για τους ίδιους αγωγούς (Koutris et al. 2017).

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι το αποχετευτικό σύστημα δεν είναι ικανό να αποχετεύσει το σύνολο της απορροής, με αποτέλεσμα φρεάτια να πλημμυρίζουν.

Για βροχοπτώσεις περιόδου επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας 1 και 12 ωρών, διαστασιολογήθηκαν αειφόρα μέτρα διαχείρισης της όμβριας απορροής (LIDs) στην ήδη αστικοποιημένη λεκάνη. Στόχος ήταν η βελτίωση της κατανόησης, στο κατά πόσο αυτές οι μέθοδοι, μπορούν να πετύχουν μείωση της απορροής και αποφυγή πλημμυρισμού του συστήματος. Δημιουργήθηκαν 7 σενάρια με βάση 3 LID και των συνδυασμό αυτών μεταξύ τους. Τα LID αυτά ήταν οι πράσινες οροφές, τα περατά πεζοδρόμια και η αποσύνδεση οροφής.

Τέλος, υπολογίστηκε το κόστος κεφαλαίου-κατασκευής για κάθε σενάριο, η σχέση αυτού με την μείωση της απορροής, το κόστος κύκλου ζωής κάθε σεναρίου αλλά και το περιβαλλοντικό όφελος των επιμέρους έργων ανά έτος.

Τα κυριότερα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν είναι:

- Όλα τα σενάρια κατάφεραν να μειώσουν την αιχμή της απορροής και τον όγκο της απορροής. Εκ τούτου κρίνονται ικανοποιητικά και σίγουρα προτιμότερα από την επιλογή ενός μηδενικού σεναρίου, στο οποίο καμία ενέργεια δεν πραγματοποιείται.
- Όλα τα συνδυαστικά σενάρια, δηλαδή όσα χρησιμοποίησαν 2 ή 3 LID πέτυχαν μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της απορροής από ότι όσα εφαρμόστηκαν μεμονωμένα, με κορυφαίο το σενάριο 7.
- Η εφαρμογή των LID δεν συνεπάγεται πάντα τα ανάλογα επιθυμητά αποτελέσματα, καθώς βάσει της βιβλιογραφίας (Tao et al. 2017, Kourtis et al. 2018) οι μελέτες σε συγκεκριμένες λεκάνες έδειξαν ότι έχουν καλύτερη απόδοση για γεγονότα χαμηλής έντασης και μικρής διάρκειας τόσο στη μείωση του όγκου της απορροής όσο και στην μείωση της αιχμής, ενώ έχουν τις χειρότερες επιδόσεις για γεγονότα υψηλής έντασης και μεγάλης διάρκειας.
- Το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής έχουν τα συνδυαστικά σενάρια και μάλιστα το σενάριο 4, που αποτελείται μόνο από δύο μέτρα, είχε μεγαλύτερο από το αμέσως επόμενο σενάριο 7 λόγω της μεγάλης παρουσίας πράσινων οροφών.
- Για τον ίδιο ακριβώς λόγο το μεγαλύτερο κόστος κύκλου ζωής, περιλαμβάνει τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, εμφάνιζε πάλι το ίδιο σενάριο.
- Ακόμα παρόλο το υψηλό κόστος που εμφανίζει το συγκεκριμένο σενάριο δεν πετυχαίνει το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της απορροής.
- Αυτές οι εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης των όμβριων υδάτων παρουσιάζουν υψηλό κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας. Αυτό έχει αποτέλεσμα να



εμφανίζονται απαγορευτικές, αν μελετηθούν αποκομμένες, από όλα τα επιπρόσθετα οφέλη που παρουσιάζουν (οικονομικά, ποιοτικά κτλ). Το οικονομικό σκέλος αυτών στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε βιβλιογραφικά (Alves et al. 2019) ως περιβαλλοντικό όφελος, αποτελώντας ένα ιδιαιτέρως υψηλό ποσό. Το υψηλότερο περιβαλλοντικό όφελος εμφανίζει το σενάριο 4 και εν συνεχεία το σενάριο 7.

- Τέλος, προκρίνεται το σενάριο 7 ως μια αξιόλογη πρακτική, καθώς πετυχαίνει το υψηλότερο ποσοστό μείωσης της αιχμής, χωρίς να εμφανίζει το υψηλότερο κόστος κεφαλαίου ή κόστος κύκλου ζωής, και με το δεύτερο μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος σε χρηματικές μονάδες.

## 6.2 Προτάσεις

Όσον αφορά τις προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν μόνο 3 LIDs και ο συνδυασμός αυτών δηλαδή 7 σενάρια. Οι εναλλακτικές μέθοδοι ωστόσο που υπάρχουν είναι πολύ περισσότερες. Επίσης οι περισσότερες τέτοιες μελέτες επικεντρώνονται κατά κόρον στο υδρολογικό κομμάτι, χωρίς να εμβαθύνουν στα υπόλοιπα πλεονεκτήματα. Ακόμα μια ολοκληρωμένη μελέτη της περιοχής, θα καταδείκνυε τα μέτρα εκείνα που είναι τα καταλληλότερα να εφαρμοστούν. Πιο συγκεκριμένα:

- Ενδιαφέρουσα θα ήταν μια έρευνα που θα αφορούσε την εφαρμογή πληθώρας εναλλακτικών μεθόδων που μπορούν να εφαρμοστούν στην περιοχή και της ανάδειξης της πλέον αποτελεσματικής στο υδρολογικό κομμάτι (μείωση του όγκου της απορροής και της αιχμής) και της πιο οικονομικά συμφέρουσας (κόστος κατασκευής και κύκλου ζωής).
- Εκτίμηση του οικονομικού οφέλους που προκύπτει από τα πλεονεκτήματα των αειφόρων μέτρων, όπως η θερμομόνωση των κτιρίων, άρα και μείωση των κοστών θέρμανσης-ψύξης, αλλά και εκτίμηση της μείωσης του κόστους των ζημιών που προκαλούνται σε τυχόν πλημμύρες.
- Εκτίμηση του αισθητικού-ποιοτικού οφέλους. Για παράδειγμα τα περατά οδοστρώματα και οι πράσινες στέγες όχι μόνο μειώνουν την πλημμύρα και ωφελούν την ποιότητα του νερού, αλλά και βελτιώνουν την αισθητική του χώρου.
- Επίσης ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μια εργασία, όπου θα υπολόγιζε τις απορροές των ομβρίων που συλλέγονται από διάφορα LID, π.χ. τα βαρέλια βροχής και τις δεξαμενές, ώστε να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως οι εγκαταστάσεις

ποτίσματος ή το νερό στις τουαλέτες. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να καθίσταται ένα κτίριο αυτόνομο ως προς την ανάγκη ζήτησης επαναχρησιμοποιούμενου νερού.

- Επέκταση των αναλύσεων σε μεγαλύτερες περιοχές, γεγονός που θα μπορούσε να παράσχει μια σαφέστερη εικόνα των επιπτώσεων τόσο των LID όσο και των συμβατικών μέτρων στο αστικό δίκτυο αποχέτευσης.
- Αξιοποίηση του συνδυασμού πράσινων και γκρίζων υποδομών (Green and Grey Infrastructure), καθώς σε μελέτες πολυκριτηριακής ανάλυσης, εμφανίζεται ως ο καλύτερος τρόπος για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία μπροστά σε ακραία γεγονότα βροχής και παράλληλα εξασφαλίζει οφέλη που προσφέρει η πράσινη υποδομή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alves A., Gersonius B., Kapelan., Vojinovica Z., Sanchez A., 2019. Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management, *Journal of Environmental Management*, 239, 244–254.

Ashley R., Lundy L., Ward S., Shaffer P., Walker L., Morgan C., Saul A., Wong T., Moore S., 2013. Water-sensitive urban design: opportunities for the UK. *Proceedings of the ICE-Municipal Engineer*, 166 (2), 65–76.

Barrett, M. 2005. Performance comparison of structural stormwater best management practices. *Water Environment Research* 77, 78-86.

Bellos V., Kourtis I., Moreno-Rodenas A., 2017. Quantifying Roughness Coefficient Uncertainty in Urban Flooding Simulations through a Simplified Methodology, *Water*, 9, 944.

Benedict M.A., McMahon E.T., 2002. *Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century*. Washington, D.C.

Burszta-Adamiak E., Mrowiec M., 2013. Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM, *Water Science & Technology* 68.1, 36-42.

Butler D., Digman C. J., Makropoulos C., Davies J. W., 2018. *Urban drainage*, 4<sup>th</sup> Edition.

Chenot J., Gaget E., Moinardeau C., Jaunatre R., Buisson E., Dutoit T., 2017. Substrate Composition and Depth Affect Soil Moisture Behavior and Plant-Soil Relationship on Mediterranean Extensive Green Roofs, *Water*, 9, 817.

Chu L., Fwa T. F., 2019. Evaluation of surface infiltration performance of permeable pavements, *Journal of Environmental Management* 238, 136–143.

Chui T. F. M., Liu X, Zhan W., 2016. Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events, *Journal of Hydrology* 533, 353–364.

Center for Neighborhood Technology, 2010. The value of green infrastructure; a guide to recognizing its economic, environmental and social benefits. [https://www.cnt.org/sites/default/files/publications/CNT\\_Value-of-Green-Infrastructure.pdf](https://www.cnt.org/sites/default/files/publications/CNT_Value-of-Green-Infrastructure.pdf) (Accessed 18 November 2019).

Cipolla S. S., Maglionico M., Stojkov I., 2016. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM, *Ecological Engineering*, 95, 876–887.

CIRIA, 2000. Sustainable urban drainage systems – design manual for Scotland and Northern Ireland. Dundee, Scotland: CIRIA Report No. C521.

CIRIA, 2001. Sustainable urban drainage systems - best practice manual for England, Scotland, Wales and Northern Ireland. London, United Kingdom: CIRIA Report No. CR086A.

CIRIA, 2015. The Suds Manual. London, United Kingdom: CIRIA Report No. C753.

County of Los Angeles, 2009. Low Impact Development Standards Manual. [https://www.unigroupusa.org/PDF/LA\\_County\\_LID\\_Manual.pdf](https://www.unigroupusa.org/PDF/LA_County_LID_Manual.pdf) (Accessed 12 November 2019).

Dileo J.A., 2018. Evaluating Capital and Maintenance Costs for Four Low Impact Development Treatment Systems, and their Efficiency in Removing Total Suspended Solids from Storm Water Runoff, Master's Projects and Capstones, University of San Francisco.

Eagles, P., 1981. Environmental sensitive area planning in Ontario, Canada. *Journal of the American Planning Association*, 47 (3), 313–323.

Fletcher T. D., Shuster W., Hunt W. F., Ashley R., Butler D., Arthur S., Trowsdale S., Barraud S., Semadeni-Davies A., Bertrand-Krajewski J. L., Mikkelsen P. S., Rivard G., Uhl M., Dagenais D., Viklander M., 201. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage, *Water Urban Journal*, 12, 7, 525–542.

Gülbas S., Kazezyilmaz-Alhan C. M., 2018. Impact of LID Implementation on Water Quality in Alibeyköy Watershed in Istanbul, Turkey, *Environmental Processes*.

Houle J.J., Roseen R.M., Ballesterio T.P., Puls T.A., Sherrard J.Jr., 2013. Comparison of maintenance cost, labor demands, and system performance for LID and conventional stormwater management. *Journal of Environmental Engineering* 139, 932-938.

Joksimovic D., Alam Z. 2014. Cost Efficiency of Low Impact Development (LID) Stormwater Management Practices, *Procedia Engineering* 89, 734 – 741.

Kourtis I. M., 2017. Calibration and validation of SWMM model in two urban catchments in Athens, Greece, 15th International Conference on Environmental Science and Technology.

- Kourtis I. M., Tsihrintzis V. A., Baltas E., 2018. Simulation of Low Impact Development (LID) Practices and Comparison with Conventional Drainage Solutions, Proceedings.
- Krause P., Boyle D.P., Båse F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
- Krebs G., Kuoppamäki K., Kokkonen T., Koivusalo H., 2016. Simulation of green roof test bed runoff, *Hydrological Processes* 30, 250–262.
- Lee J. G., Selvakumar A., Alvi K., Riverson J., Zhen J. X., Shoemaker L., Lai F., 2012. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices *Environmental Modelling & Software* 37, 6-18.
- Liao Z. L., He Y., Huang F., Wang S., Li H. Z., 2013. Analysis on LID for highly urbanized areas' waterlogging control: demonstrated on the example of Caohejing in Shanghai, *Water Science & Technology*, 68.12, 2559 – 2567.
- Luan Q., Fu X., Song C., Wang H., Liu J., Wang Y., 2017. Runoff Effect Evaluation of LID through SWMM in Typical Mountainous, Low-Lying Urban Areas: A Case Study in China, *Water*, 9, 439.
- McCuen R. H., 1998. *Hydrologic analysis and design*, Second Edition.
- McCuen R. H., Knight Z., Cutter G., 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index, *Journal of Hydrologic Engineering* 11, 597-602.
- Mei C., Liu J., Wang H., Yang Z., Ding X., Sao W., 2018. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed, *Science of the Total Environment*, 639, 1394–1407
- Mimikou M., Baltas E., Varanou E., 2000. A Study of Extreme Storm Events in the Athens Greater Area.
- Mitchel V. G., 2006. Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience, *Environmental Management* 37, 5, 589–605.
- Muleta M.K., McMillan J., Amenu G.G., Burian S.J., 2012. Bayesian approach for uncertainty analysis of an urban storm water model and its application to a heavily urbanized watershed, *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(10), 1360-1371.

Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

Palla A., Gneco I., 2015. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale, *Journal of Hydrology* 528, 361–368.

Rossman L.A., 2010. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0, United States Environmental Protection Agency.

Rossman L.A., 2016. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.1, United States Environmental Protection Agency.

Rossman L.A., 2016. Storm Water Management Model Reference Manual, Volume III-Water Quality, United States Environmental Protection Agency.

Tao J., Li Z., Peng X., Ying G., 2017. Quantitative analysis of impact of green stormwater infrastructures on combined sewer overflow control and urban flooding control, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*.

Tsihrintzis V. A., Hamid R., 1998. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM, *Hydrological Processes*, 12, 311-329.

Toronto Region Conservation Authority, 2007. An Economic Analysis of Green Roofs: Evaluating the costs and savings to business owners in Toronto and surrounding regions. Toronto, Canada.

Toronto Region Conservation Authority, 2010. Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide. Toronto, Canada.

Water Sensitive Urban Design Guidelines, 2013. South Eastern Councils. <https://www.melbournewater.com.au/sites/default/files/South-Eastern-councils-WSUD-guidelines.pdf> (Accessed 12 November 2019).

Zhou Q., 2014. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts, *Water*, 6, 976-992.

#### ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2018. Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Πελοποννήσου, ΥΠΕΚΑ.

Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2011.

Κούρτης Ι., 2016. Προσομοίωση παντορροϊκού δικτύου με το λογισμικό SWMM και πρόταση μέτρων αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων, Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., 1999. Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ., 2011. Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης (Έκδοση 4), Αθήνα.

Μιμίκου Μ.Α., 2006. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, (Έκδοση 3), Αθήνα.

Μπαλτάς Ε., 2018. Σημειώσεις Μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Τζιβάνη Ε., 2008. Συγκριτική διερεύνηση πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού από συνθετικές βροχοπτώσεις σε μικρές λεκάνες απορροής, Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Τζίμα Μ., 2019. Υδρολογική προσομοίωση αστικής λεκάνης με το λογισμικό SWMM και εκτίμηση της επίδρασης της διακριτοποίησης της λεκάνης, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Π.Δ 696/74 (1974). Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κ.λπ. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και Κτιριακών Έργων, ως και Τοπογραφικών, Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών εργασιών και των σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών.

Τσακίρης Γ., 2010. Υδραυλικά Έργα-Σχεδιασμός και Διαχείριση (Τόμος Ι: Αστικά Υδραυλικά Έργα), Αθήνα.

Τσακίρης Γ., 2013. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

Τσιχριντζής Β., 1999. Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία (Τόμος Ι: Διαχείριση Απορροής, Ρύπων και Φερτών), Ξάνθη.

#### ΙΝΤΕΡΝΕΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

[https://geopapaevan.weebly.com/uploads/1/4/6/4/1464619/%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1\\_6.pdf](https://geopapaevan.weebly.com/uploads/1/4/6/4/1464619/%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_6.pdf)

<https://greenroofs.org/>

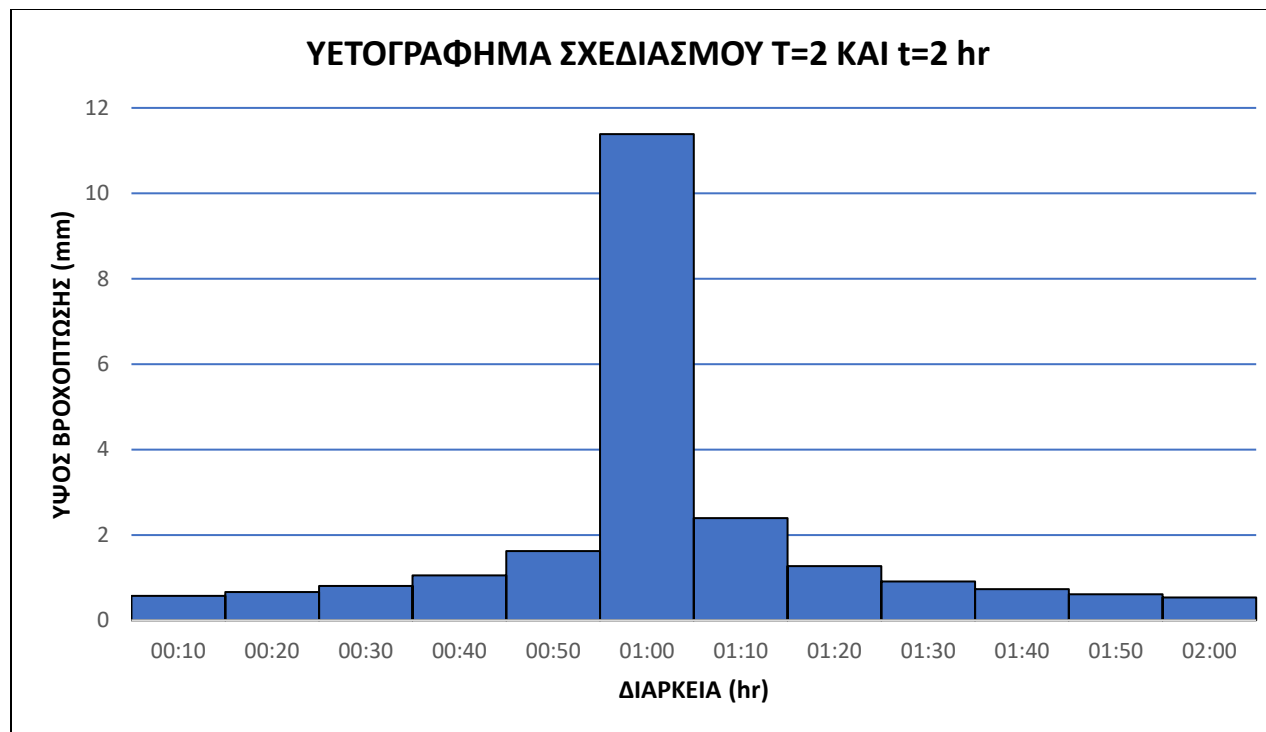
<https://www.eydap.gr/TheCompany/DrainageAndSewerage/DrainHistoricalTrackback/>

<http://wsud-denmark.com/>

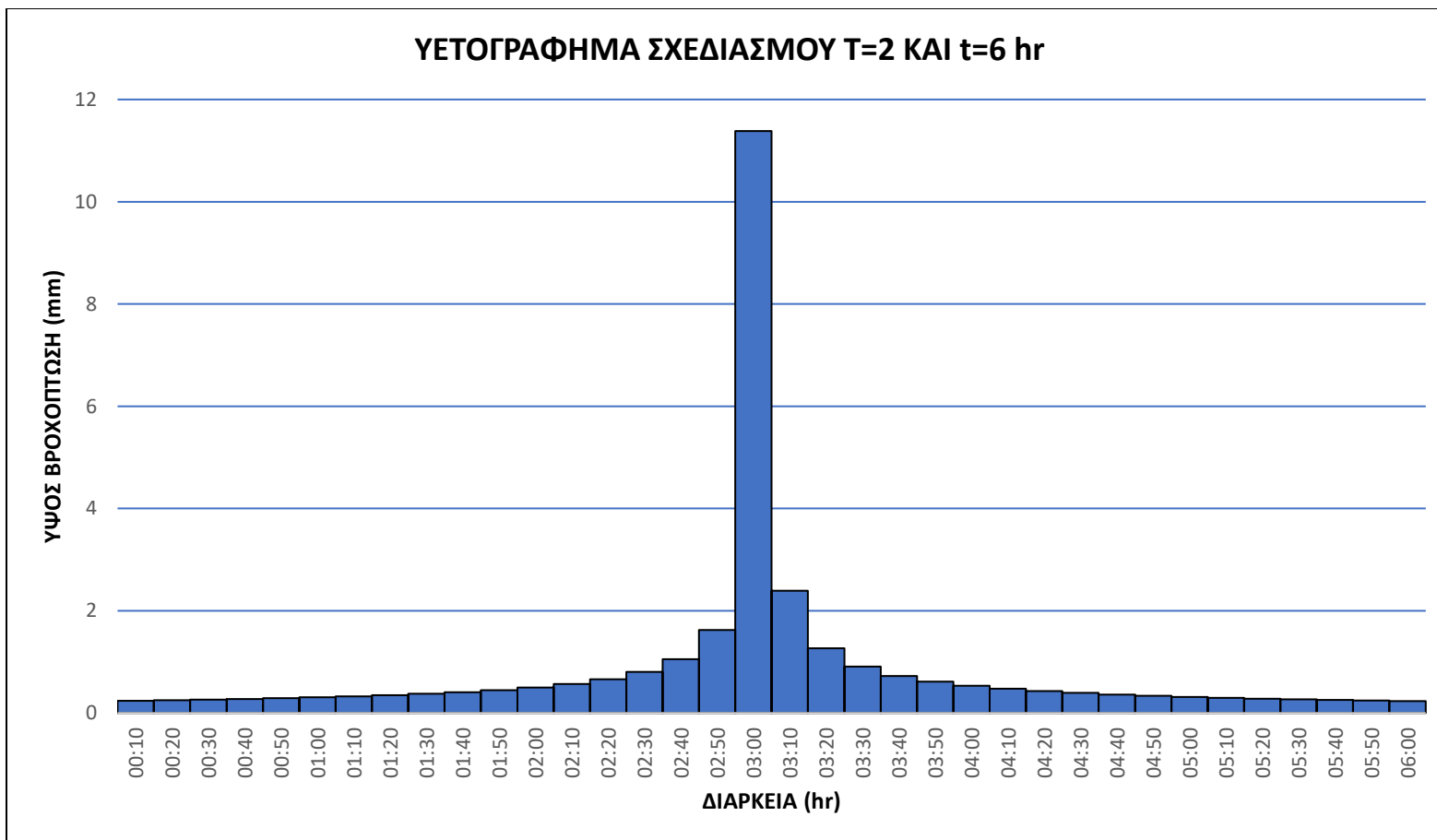


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

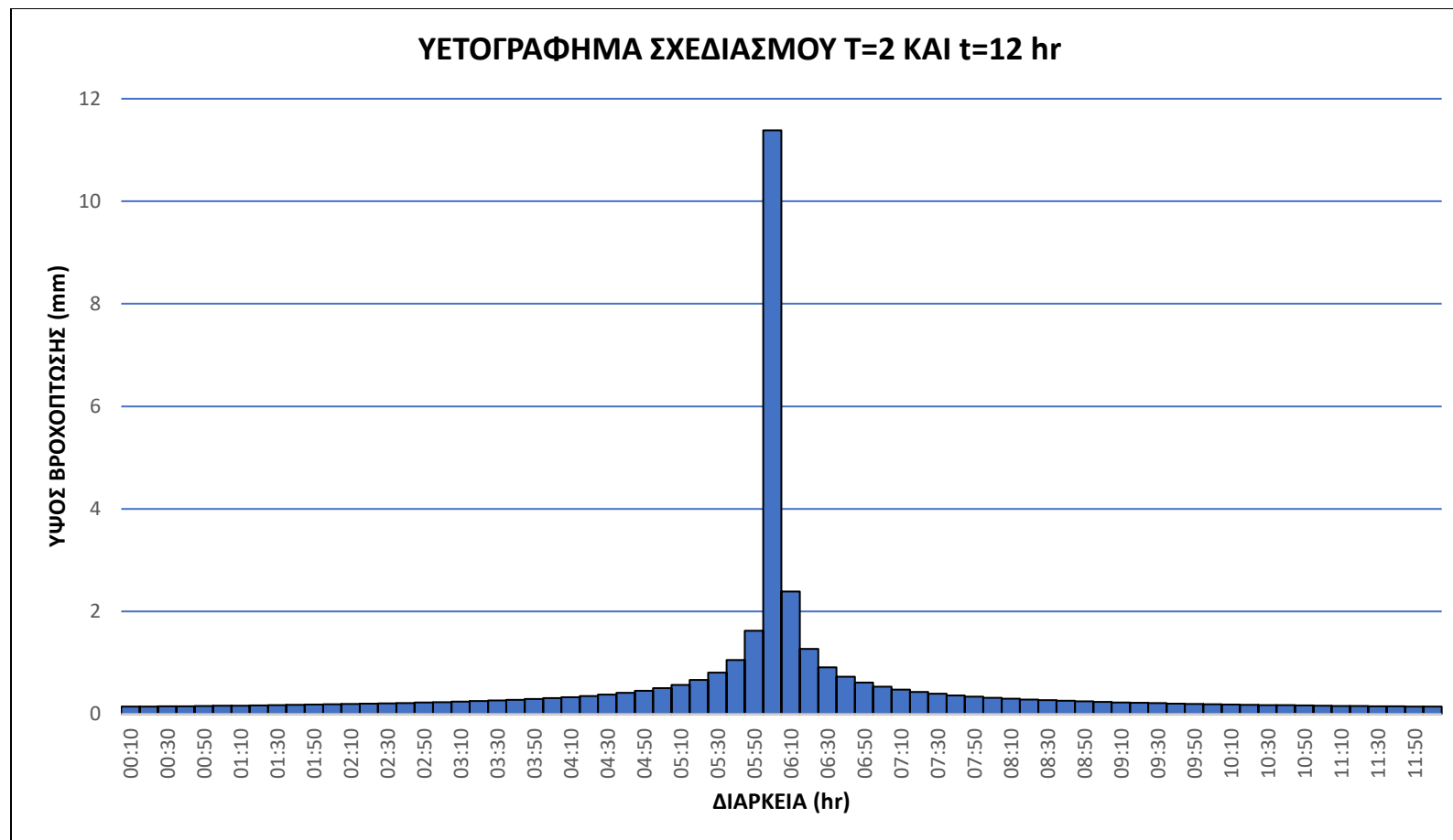
Στο παράρτημα παρουσιάζονται τα υετογραφήματα σχεδιασμού για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 25 και 50 ετών και για διάρκειες βροχόπτωσης 1, 2, 6 και 12 ωρών. Ακόμα παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των ακαθάρτων κάθε λεκάνης. Τέλος, παρουσιάζεται το περιβαλλοντικό όφελος κάθε σεναρίου.



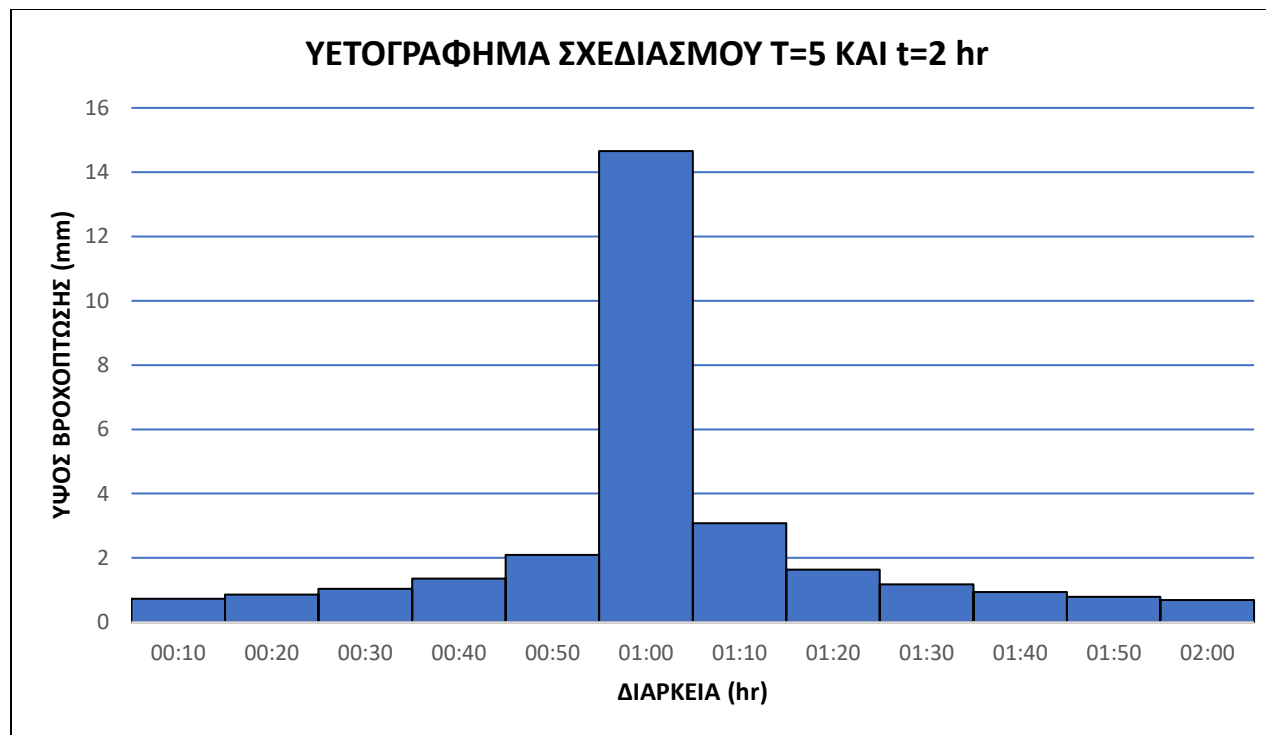
Σχήμα Α1: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=2 h



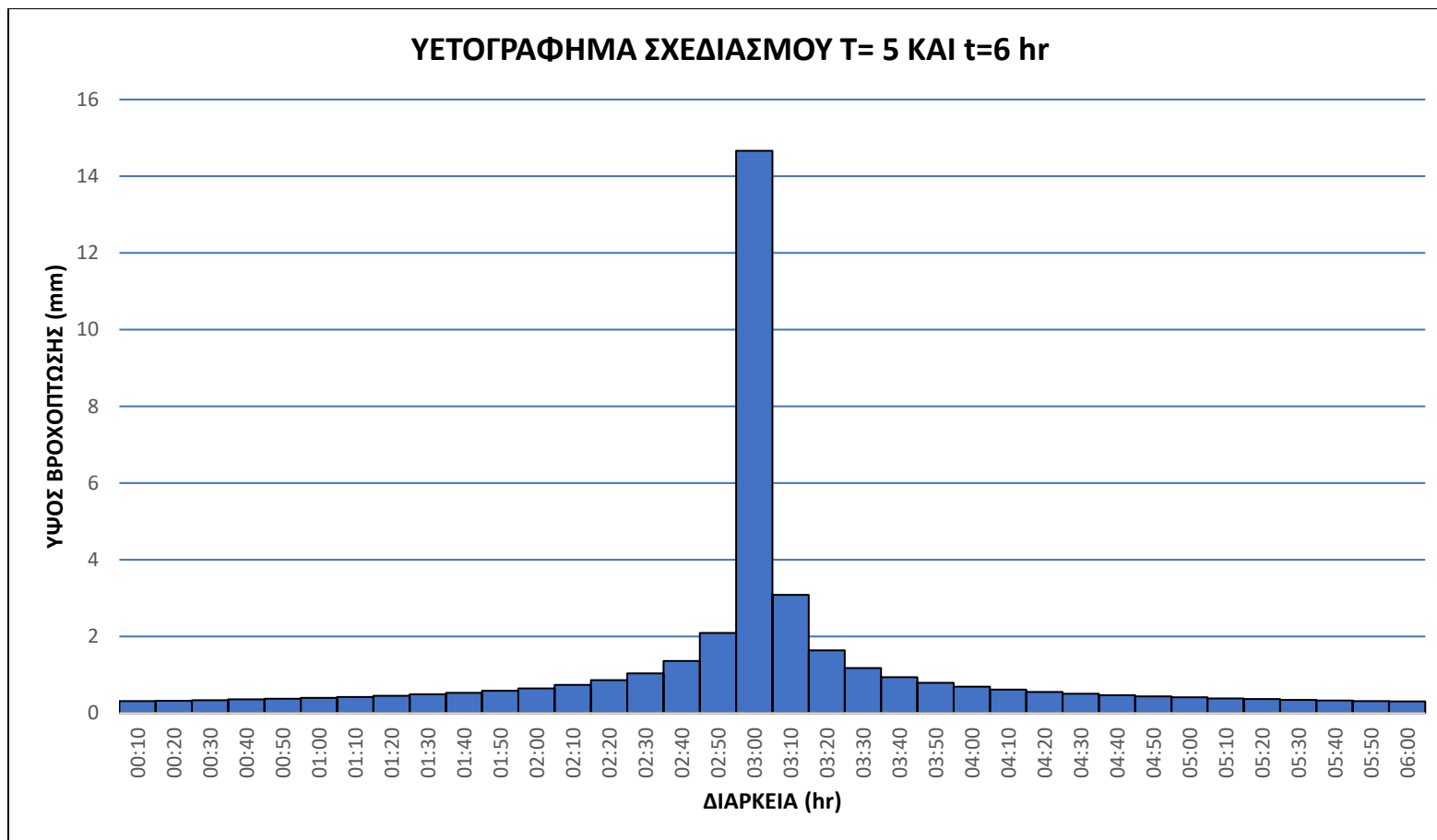
Σχήμα Α2: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=6 h



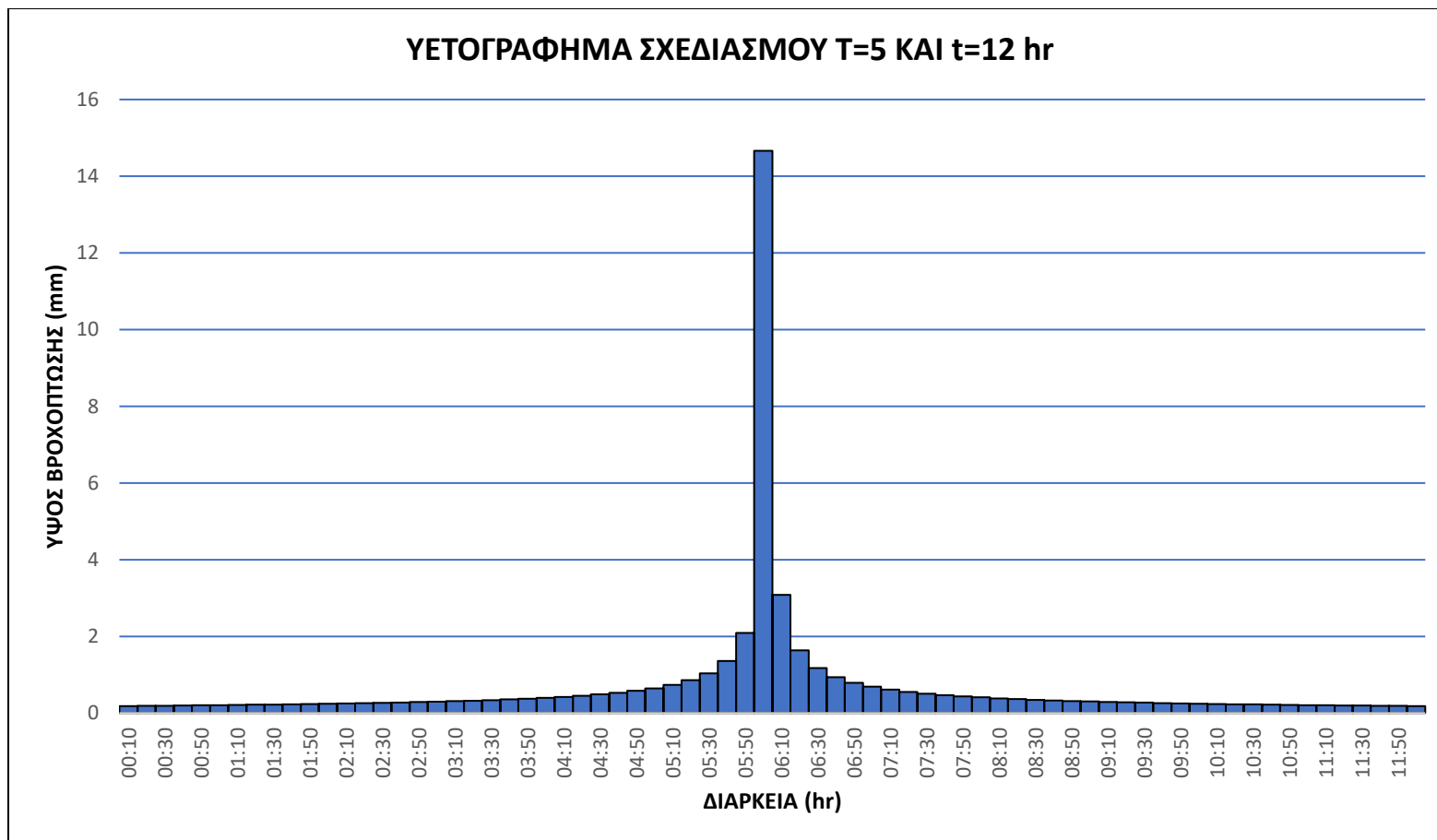
Σχήμα Α3: Υετογράφημα σχεδιασμού T=2 και t=12 h



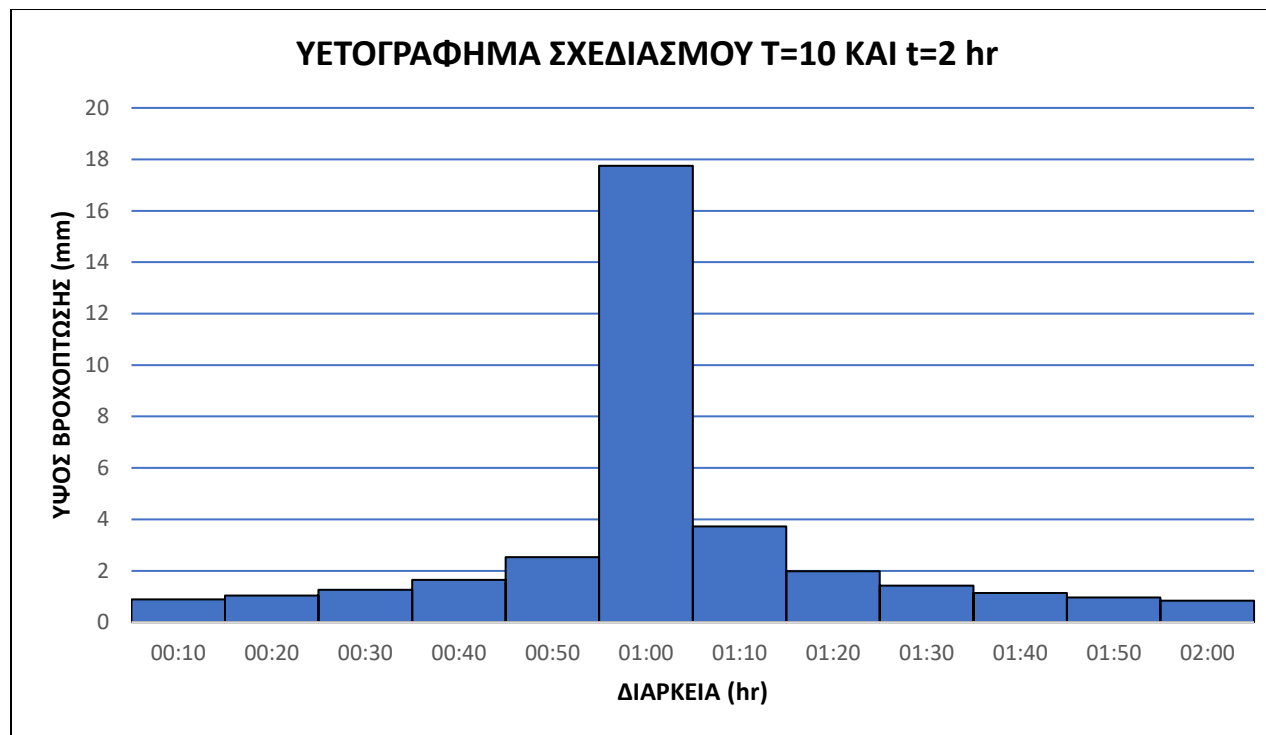
Σχήμα A4: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=2h



Σχήμα Α5: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=6h

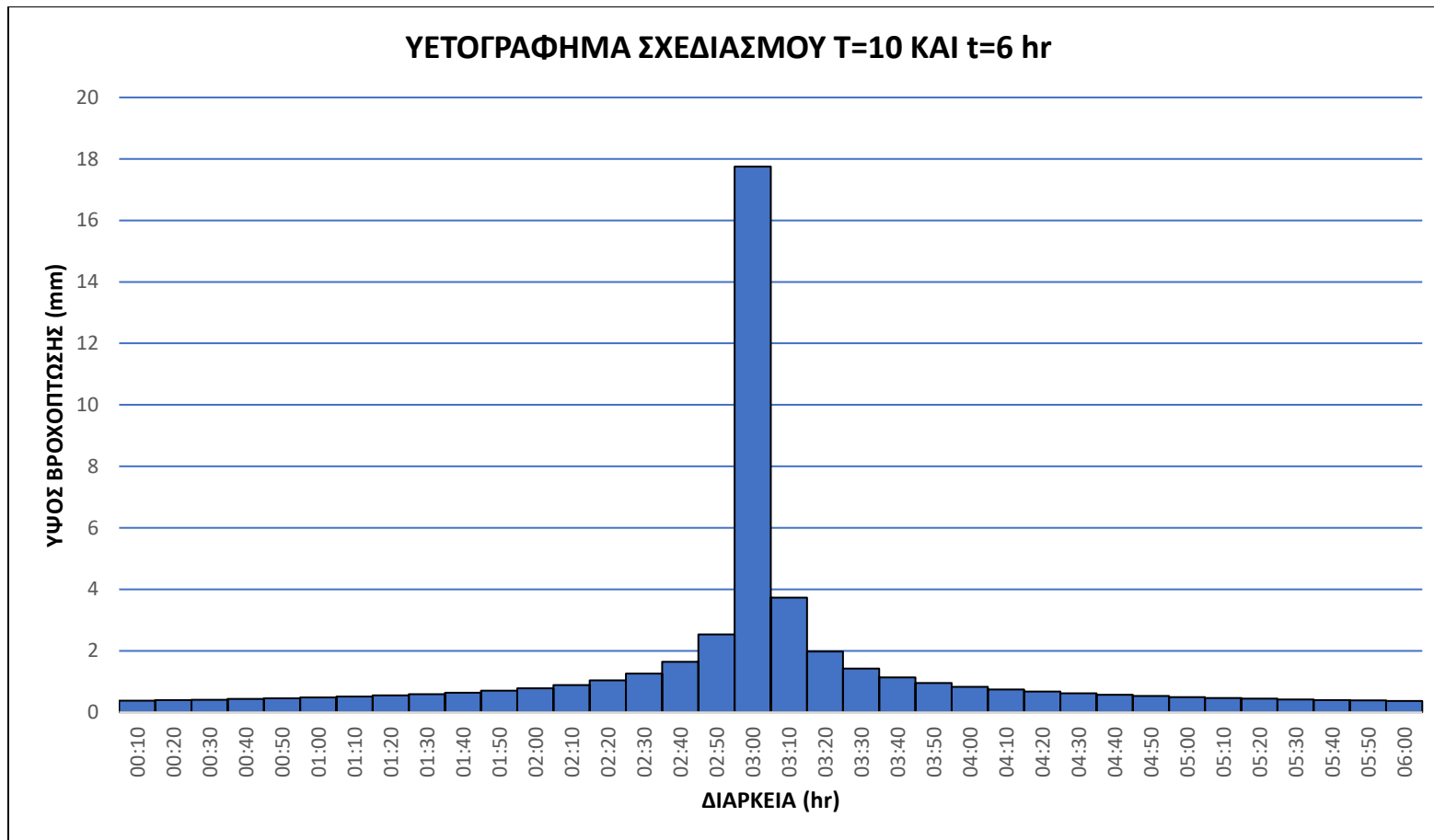


Σχήμα Α6: Υετογράφημα σχεδιασμού T=5 και t=12h

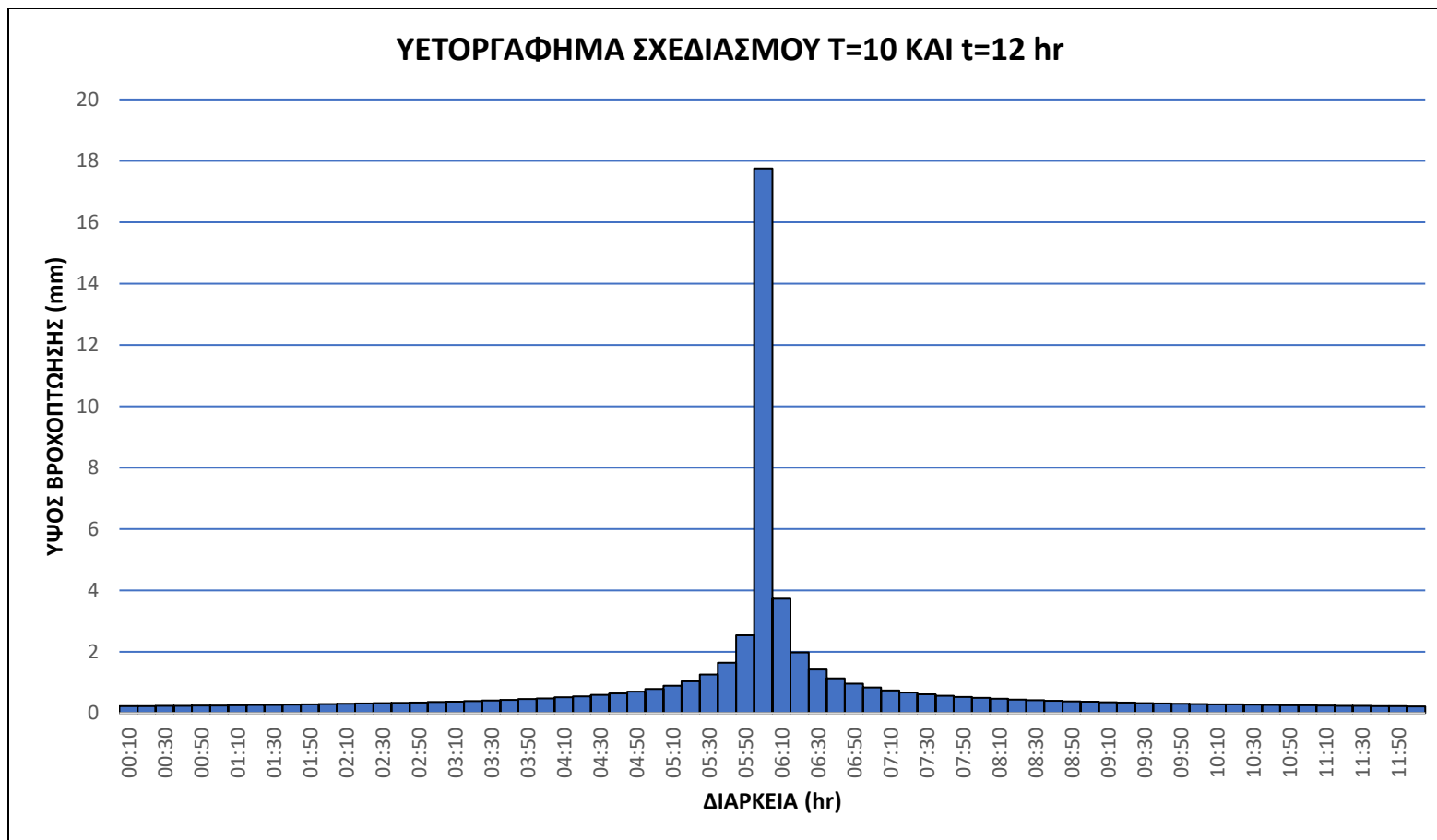


Σχήμα Α7: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=2h

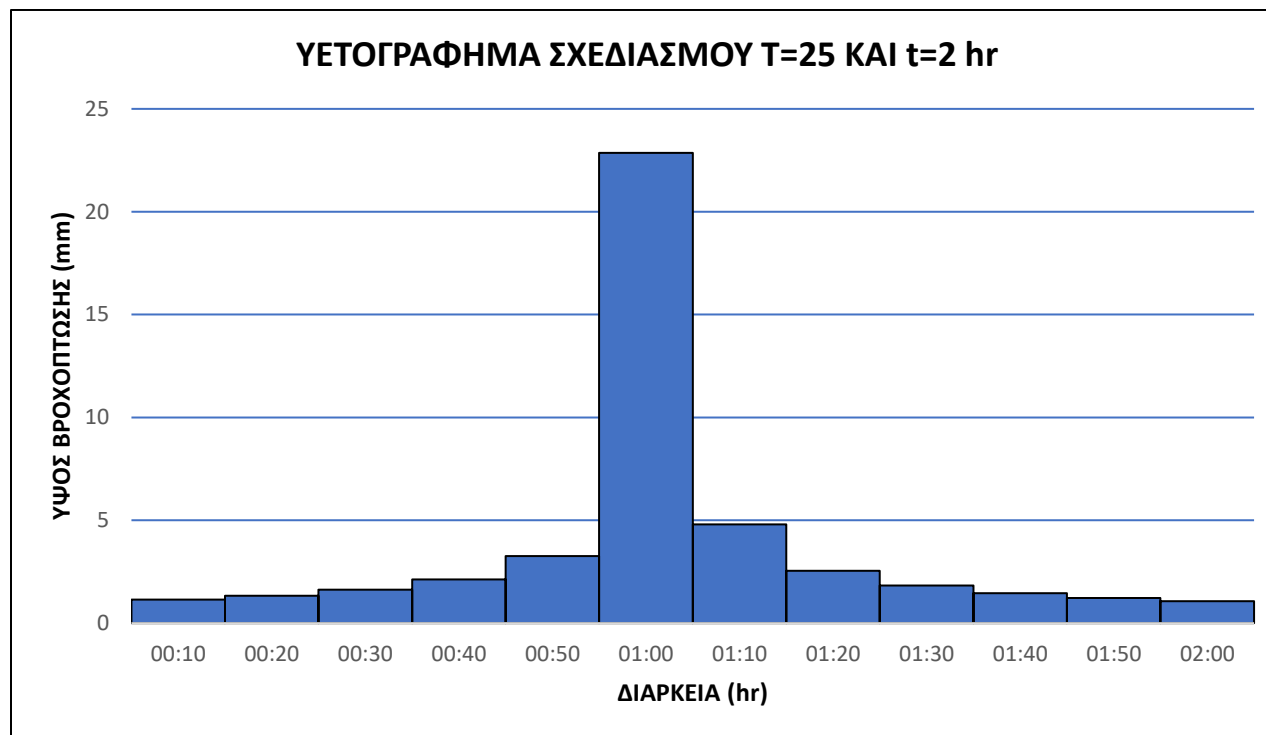




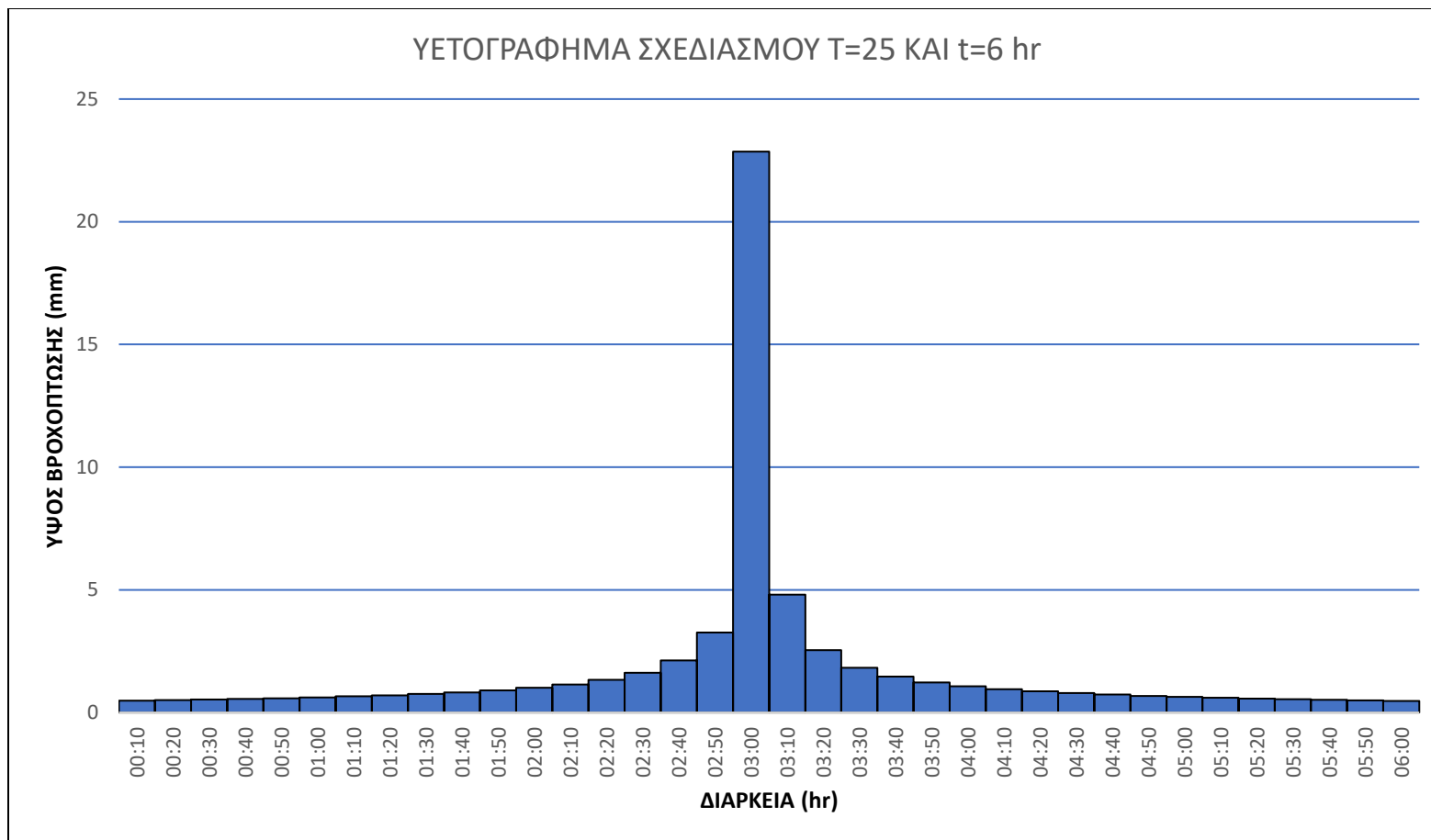
Σχήμα A8: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=6h



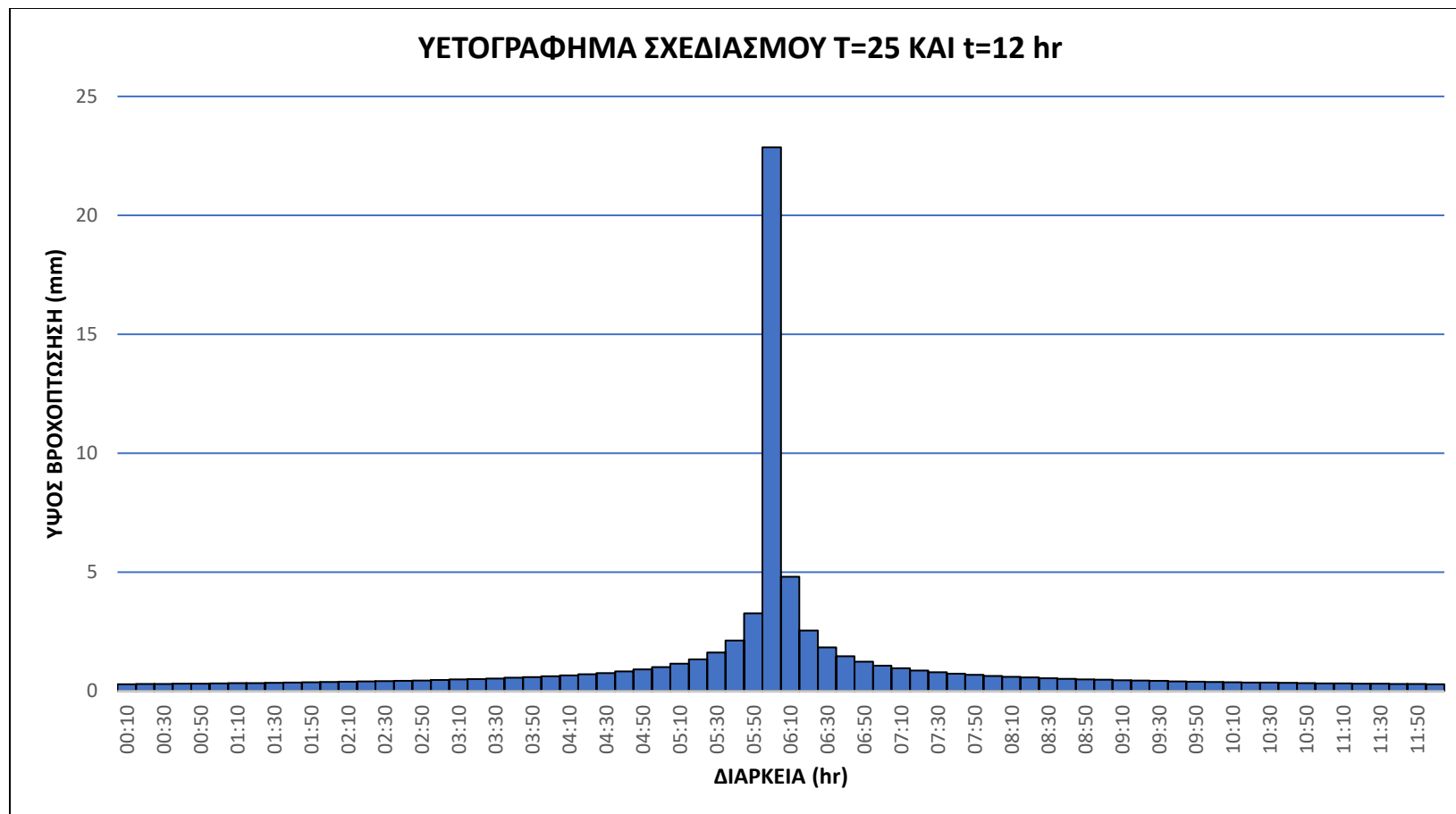
Σχήμα Α9: Υετογράφημα σχεδιασμού T=10 και t=12h



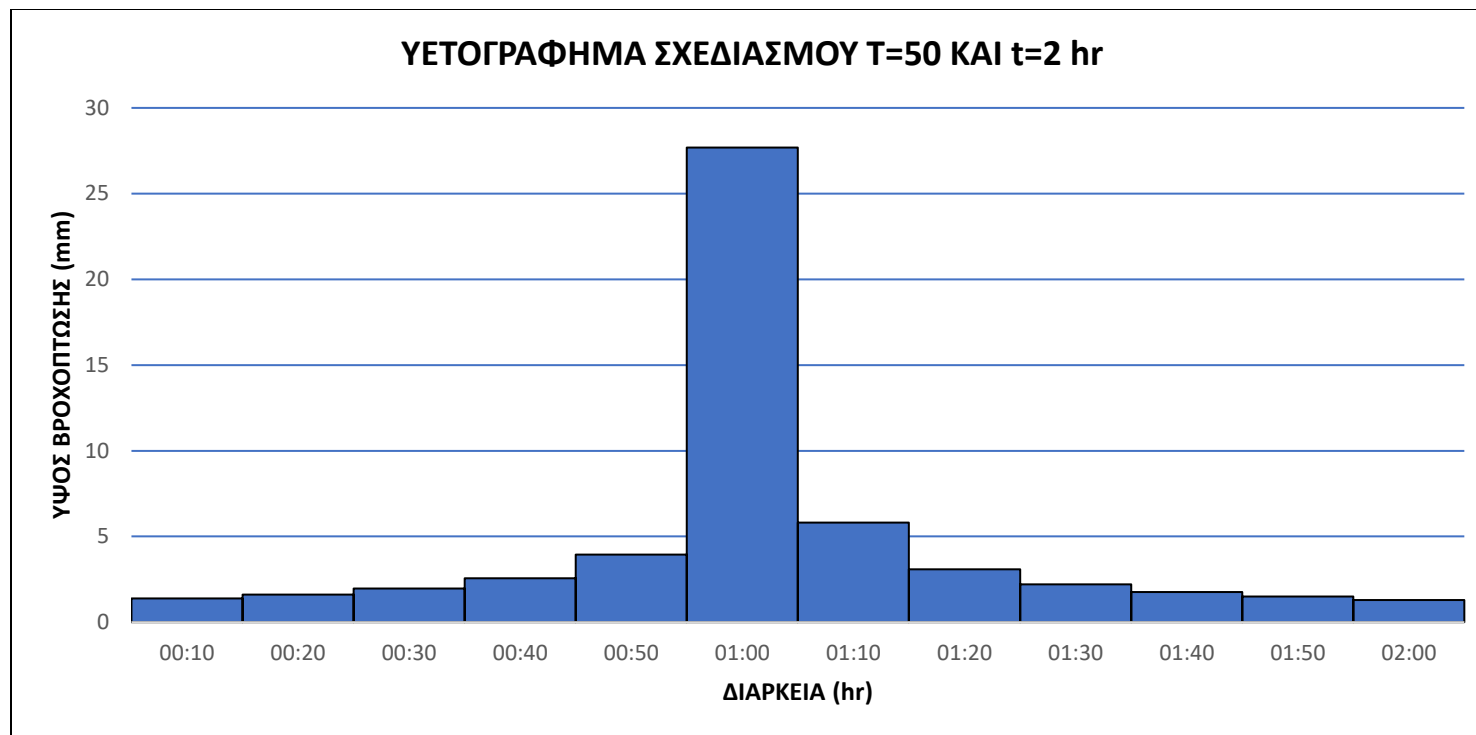
Σχήμα Α10: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=2h



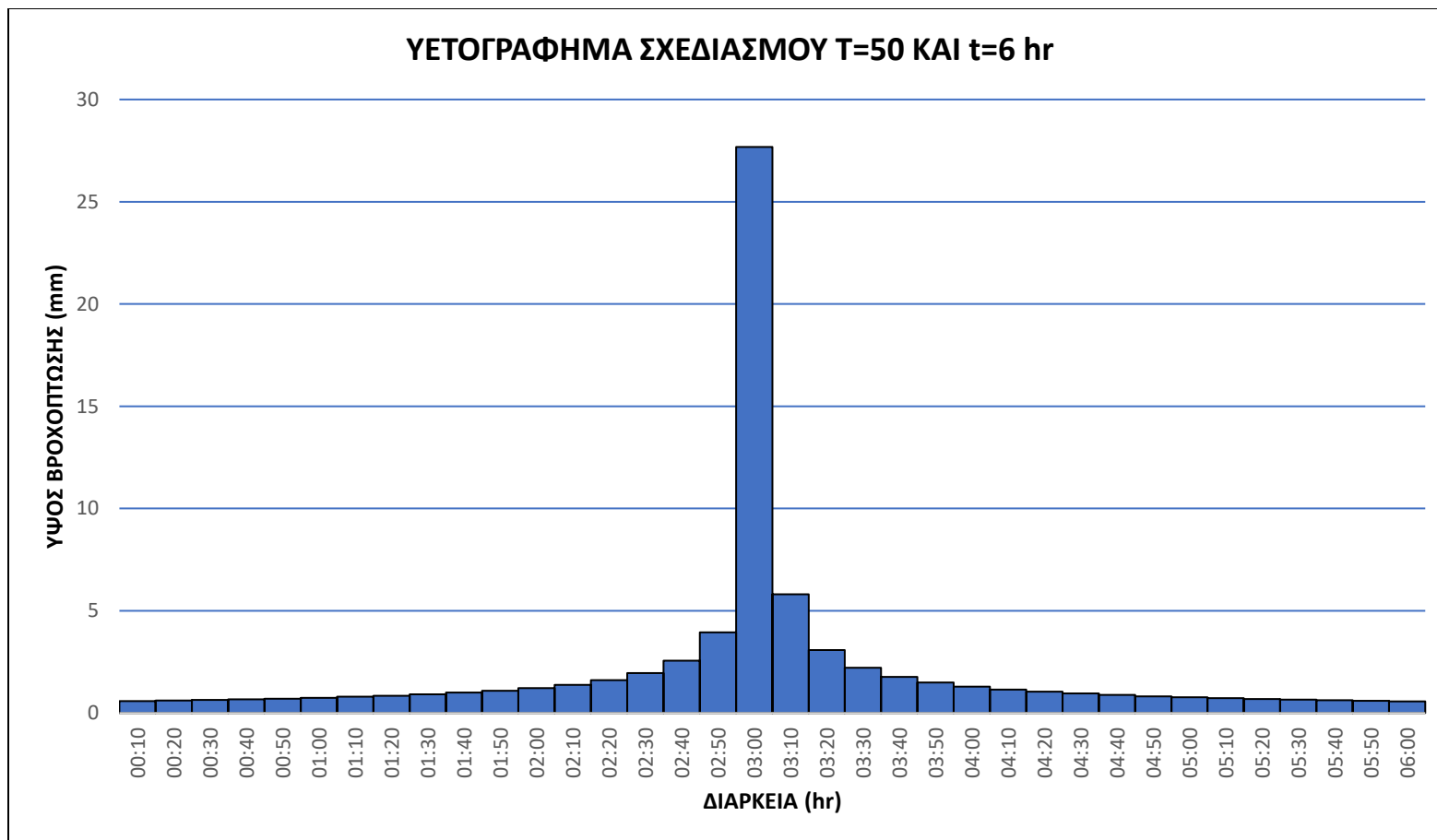
Σχήμα Α11: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=6h



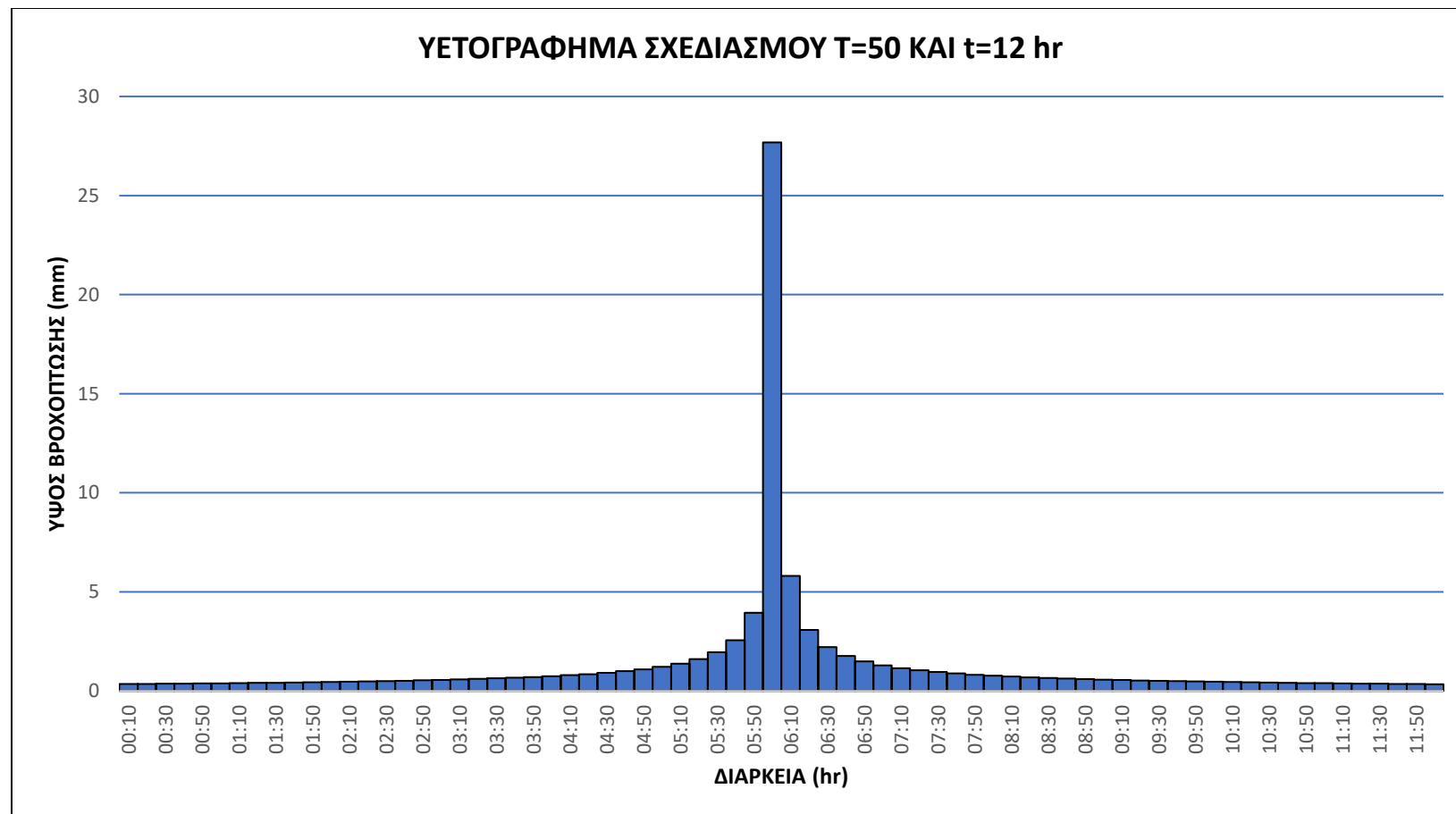
Σχήμα Α12: Υετογράφημα σχεδιασμού T=25 και t=12h



Σχήμα Α13: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=2h



Σχήμα Α14: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=6h



Σχήμα Α15: Υετογράφημα σχεδιασμού T=50 και t=12h



Πίνακας Α1: Υπολογισμός ακαθάρτων υπολεκανών

Λεκάνες	S395100	S395101	S395126	S395133	S395132	S395123	S416155	S416156	S435227	S415282	S435221	S435226
Area m2	-	12305.8	11982.32129	-	89704.64424	30773.92098	114031	69473.844	53249.694	83077.6	15899.01	102089.5
area km2	-	0.012306	0.011982321	-	0.089704644	0.030773921	0.114031	0.0694738	0.0532497	0.083078	0.015899	0.102089
άλσος-βουνό	-	-	-	-	0.04	-	0.05	-	-	-	-	0.01
final area km2	-	0.012306	0.011982321	-	0.049704644	0.030773921	0.064031	0.0694738	0.0532497	0.083078	0.015899	0.092089
Πληθυσμός P <sub>v</sub>	-	210	204	-	847	524	1091	1184	908	1416	271	1569
F1		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Qd <sub>max</sub>		0.970936	0.945413471		3.921730948	2.428083736	5.052088	5.4815345	4.2014379	6.55488	1.254443	7.265925
Μέση ημερήσια κατανάλωση q (L/d/κάτοικο)	-	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
μ	-	0.8	0.8	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
QAd <sub>max</sub>		0.776749	0.756330776	-	3.137384758	1.942466989	4.04167	4.3852276	3.3611503	5.243904	1.003554	5.81274
P		4.33661	4.374644354	-	2.911419514	3.29375525	2.743539	2.693834	2.8636284	2.591723	3.995569	2.53693
QA <sub>hmax</sub> (L/s)		3.368458	3.308678161	-	9.134243206	6.398010843	11.08848	11.813075	9.6250855	13.59075	4.00977	14.74652

Πίνακας Α2: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 4

FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/m <sup>2</sup> /y)
100	Green_Roof	1	76	221.16
101	Green_Roof	22	63	4007.652
126	Green_Roof	16	62	2877.408
133	Green_Roof	0	0	0
132	Green_Roof	105	76	23099.58
123	Green_Roof	70	63	12914.58
155	Green_Roof	133	87	33516.798
156	Green_Roof	162	82	38420.73
282	Green_Roof	191	83	46021.068
227	Green_Roof	130	77	29280.42
221	Green_Roof	34	71	7054.422
226	Green_Roof	207	74	44756.091
			<b>sum</b>	<b>242169.909</b>

(α)

FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/m <sup>2</sup> /y)
100	Permeable Pavement	1	278	797.86
101	Permeable Pavement	2	571	3277.54
126	Permeable Pavement	0	0	0
133	Permeable Pavement	0	0	0
132	Permeable Pavement	18	473	24435.18
123	Permeable Pavement	13	487	18169.97
155	Permeable Pavement	23	328	21651.28
156	Permeable Pavement	32	372	34164.48
282	Permeable Pavement	32	414	38021.76
227	Permeable Pavement	14	606	24349.08
221	Permeable Pavement	8	478	10974.88
226	Permeable Pavement	43	578	71330.98
			<b>sum</b>	<b>247173.01</b>

(β)

Πίνακας Α3: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 5

FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/m <sup>2</sup> /y)
100	Green_Roof	1	76	221.16
101	Green_Roof	22	63	4007.652
126	Green_Roof	16	62	2877.408
133	Green_Roof	0	0	0
132	Green_Roof	105	76	23099.58
123	Green_Roof	70	63	12914.58
155	Green_Roof	133	87	33516.798
156	Green_Roof	160	82	37946.4
282	Green_Roof	190	83	45780.12
227	Green_Roof	130	77	29280.42
221	Green_Roof	34	71	7054.422
226	Green_Roof	207	74	44756.091
			<b>sum</b>	241454.631

Πίνακας Α4: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 6

FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/m <sup>2</sup> /y)
100	Permeable Pavement	1	278	797.86
101	Permeable Pavement	2	571	3277.54
126	Permeable Pavement	0	0	0
133	Permeable Pavement	0	0	0
132	Permeable Pavement	18	473	24435.18
123	Permeable Pavement	13	487	18169.97
155	Permeable Pavement	23	328	21651.28
156	Permeable Pavement	32	372	34164.48
282	Permeable Pavement	32	414	38021.76
227	Permeable Pavement	14	606	24349.08
221	Permeable Pavement	8	478	10974.88
226	Permeable Pavement	43	578	71330.98
			<b>sum</b>	247173.01

Πίνακας Α5: Περιβαλλοντικό όφελος ανά έτος από τη χρήση του σεναρίου 7

FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/m <sup>2</sup> /y)
100	Green_Roof	1	76	221.16
101	Green_Roof	22	63	4007.652
126	Green_Roof	16	62	2877.408
133	Green_Roof	0	0	0
132	Green_Roof	62	76	13639.752
123	Green_Roof	70	63	12914.58
155	Green_Roof	100	87	25200.6
156	Green_Roof	88	82	20870.52
282	Green_Roof	110	83	26504.28
227	Green_Roof	130	77	29280.42
221	Green_Roof	34	71	7054.422
226	Green_Roof	207	74	44756.091
			<b>sum</b>	187326.885
(α)				
FINANCIAL CO-BENEFIT				
Subcatchment	LID Control	No. of Units	Unit area (m <sup>2</sup> )	Κέρδος (€/y)
100	Permeable Pavement	1	278	797.86
101	Permeable Pavement	2	571	3277.54
126	Permeable Pavement	0	0	0
133	Permeable Pavement	0	0	0
132	Permeable Pavement	18	473	24435.18
123	Permeable Pavement	13	487	18169.97
155	Permeable Pavement	23	328	21651.28
156	Permeable Pavement	32	372	34164.48
282	Permeable Pavement	32	414	38021.76
227	Permeable Pavement	14	606	24349.08
221	Permeable Pavement	8	478	10974.88
226	Permeable Pavement	43	578	71330.98
			<b>sum</b>	247173.01
(β)				